www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

JAARGANG 21, 1959, no. 11 blz. 313-344 Verschenen 16 maart 1960

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELEND TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUKTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

EEN 75-cm-ONTVANGER VOOR RADIOASTRONOMIE EN ENIGE HIERMEE VERKREGEN RESULTATEN

door Ch. L. SEEGER *), F. L. H. M. STUMPERS en N. van HURCK.

523.164:522.6:621.396.722.029.63

De jaren van de eerste helft der 17de eeuw, toen met de pas uitgevonden telescoop in snelle opeenvolging de verrassendste ontdekkingen aan de sterrenhemel werden gedaan — de kraters van de maan, de wachters van Jupiter, de schijngestalten van Venus, de sterren van de Melkweg, enz. —, vormen een heroïek tijdperk in de geschiedenis van de astronomie. Eeuwen na ons zal men wellicht op dezelfde wijze spreken van de jaren omtrent het midden der 20ste eeuw, toen de pas ontwikkelde radiotechniek leidde tot de constructie van radiotelescopen, die opnieuw een verscheidenheid van onvermoede astronomische objecten, van geheel ander karakter dan de tot dusver bekende, aan het „licht" brachten.

Reeds sinds de oudste tijden stelt de mens belang in de sterrenhemel. Die belangstelling leidde tot de uitvinding van kijkers, spiegels en andere optische hulpmiddelen, waarmee de zichtbare, later ook de infrarode, straling nauwkeuriger en meer in detail kon worden waargenomen. Pas ongeveer 15 jaar geleden hebben de astronomen ontdekt dat naast de optiek ook de radio voor hen een machtig hulpmiddel kan vormen om hun kennis omtrent het heelal uit te breiden. In Nederland bij voorbeeld heeft men opmerkelijke resultaten verkregen door waarneming van de hemel bij de frequentie 1420 MHz (golflengte 21 cm, spectraallijn van waterstof) [1]). De waarneming is echter geenszins tot deze frequentie beperkt. Integendeel, het frequentiegebied dat door de radio beschikbaar is gekomen voor astronomische waarnemingen, is zeer uitgebreid. Wij zullen aan de objecten die hierbij onder de aandacht van de astronoom komen, in hetgeen volgt enige beschouwingen wijden. Daarnaast zullen we een eenvoudige, stabiele en gevoelige ontvanger beschrijven, die bruikbaar is in het frequentiegebied van 200 tot 500 MHz (150 tot 60 cm) en die door de Stichting Radiostraling van Zon en Melkweg reeds enige jaren met succes bij het onderzoek gebruikt wordt, o.a. op de Radiosterrenwacht Dwingeloo.

De voornaamste eis die aan zo'n ontvanger wordt gesteld, is een uiterst laag eigen ruisniveau, ten einde de zeer zwakke straling van astronomische objecten nog te kunnen meten. De prestaties in dit opzicht van de genoemde ontvanger, die dus reeds enkele jaren geleden is ontwikkeld, behoren tot het beste wat op dit gebied met klassieke elektronenbuizen te bereiken is. Wel heeft men in de laatste jaren in de parametrische versterker en de maser hulpmiddelen gevonden die een nog veel kleinere eigen ruisbijdrage tot het te meten signaal geven. Voor de toekomst verwachten wij dat vooral de parametrische versterker in de radioastronomie veel toepassing zal vinden. De ontwikkeling hiervan is echter nog te recent om nu reeds over ervaringen op radioastronomisch gebied in het door ons onderzochte deel van het frequentiespectrum te kunnen beschikken.

*) Stichting Radiostraling van Zon en Melkweg, Sterrewacht Leiden.

[1]) Zie b.v. C. A. Muller, Een ontvanger voor de radiostraling van interstellaire waterstof, I. Het onderzoek van de waterstofstraling; II. Bouw van de ontvanger, Philips techn. T. **17**, 249-259 en 341-353, 1955. — Voor een nadere uiteenzetting over diverse algemene feiten en begrippen uit de radioastronomie, zoals het ruiskarakter van de straling, het begrip antennetemperatuur, het richtingsdiagram van een paraboolantenne, enz., kunnen we naar deze artikelen verwijzen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De radiogolven uit de wereldruimte [2])

Het „optische" gebied waarin de astronoom kan werken, beslaat circa 2 octaven (globaal 0,34 tot 1,5 micron). Het nieuwe frequentiegebied dat de astronoom met de radiogolven uit de wereldruimte voor zijn onderzoek ter beschikking heeft gekregen, omvat ca. 12 octaven (*fig. 1*). Aan de ene zijde reikt dit gebied tot de millimetergolven, die worden geabsorbeerd door zuurstof en waterdamp. Aan de andere zijde reikt het tot golven van 15 of 20 meter. Langere golven laat de ionosfeer gewoonlijk niet door, al heeft men in de laatste tijd aangetoond dat af en toe openingen ontstaan, zodat ook straling met golflengten langer dan 100 meter wel eens tot de aarde doordringt [3]).

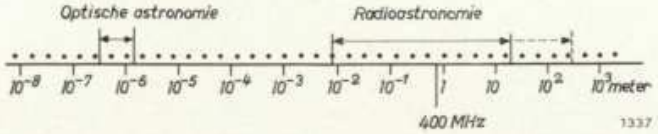


Fig. 1. Frequentiespectrum der elektromagnetische golven, waarin aangegeven de beide gebieden die voor de astronoom nuttig zijn: het „optische" gebied (ca. 0,34 tot 1,5 micron) en het radiogebied (ca. 8 mm tot 20 m, evtl. tot 300 m). De puntjes geven een indeling in octaven.

Behalve de 21-cm-straling van waterstof hebben de radioastronomen geen andere spectraallijn meer in de ontvangen straling van de hemel gevonden. Theoretisch kon men de analoge straling van deuterium en van het OH-radicaal verwachten, doch het onderzoek hiernaar heeft geen positief resultaat opgeleverd. De straling die men kan aantonen, heeft veeleer een continu spectrum.

Het is begrijpelijk dat men het eerst gedacht heeft aan de *zon* als bron van radiostraling. Sir Oliver Lodge heeft in 1894 geprobeerd of hij zulk een straling kon ontvangen. Met de hulpmiddelen van die tijd was dat echter niet mogelijk. Veel later pas, in 1942, gelukte het Hey in Engeland, vast te stellen dat de oorzaak van sommige, aanvankelijk niet te identificeren, storingen in radar bij de zon lag. Omstreeks dezelfde tijd deed ook Southworth in Amerika geslaagde ontvangstproeven met de zon als radiobron. Sindsdien zijn op dit gebied vooral in Australië uitvoerige waarnemingen gedaan. Men onderscheidt thans de achtergrondstraling van de „rustige" zon, en de sterke uitbarstingen, die met zonnevlekken en zonnevlammen samenhangen. Zelfs de beweging van zo'n storingsbron door de zonneatmosfeer kan men in detail volgen. Behalve de straling van de zon heeft men de laatste jaren in het radiospectrum ook de temperatuurstraling van de maan en van de planeten Venus, Mars, Jupiter en Saturnus waargenomen, d.i. dus de zeer langgolvige uitloper van de straling volgens Planck die deze hemellichamen uitzenden en die voor deze een maximum in het infrarood bezit. Bij Jupiter treden op bepaalde tijden nog extrastralingen op, misschien veroorzaakt door onweders, maar van veel heviger karakter dan de aardse.

Toen men tegen de min of meer gelijkmatige achtergrond van de ontvangen radiostraling uit het heelal behalve de zon ook andere zg. puntbronnen ging waarnemen — dus punten aan de hemel waar een veel sterkere straling vandaan komt dan van hun omgeving —, schreef men die straling toe aan sterren, die voorlopig „radiosterren" genoemd werden. Het bleek echter vooralsnog voor geen dezer objecten mogelijk, ze met enige optische ster te identificeren. De „radiosterren" zijn veel „helderder" dan de zon, die alleen door zijn betrekkelijk korte afstand zo'n prominente rol voor de aarde speelt. Zij kunnen de zon tot 10^{36} maal in totale uitgezonden radiostraling overtreffen (b.v. de straks te bespreken „ster" Cygnus A).

Met de nauwkeuriger plaatsvaststelling welke door interferometeropstellingen mogelijk werd (zie hieronder), gelukte het naderhand een aantal bronnen te identificeren met zichtbare objecten. Zo zijn de supernovae — sterren die men plotseling heeft zien opvlammen als gevolg van een explosie — sterke bronnen van radiostraling. Een ervan is de Krabnevel (*fig. 2*), waarvan het opvlammen in 1054 door Chinese astronomen werd waargenomen. Ook de sterkste bekende radiobron, Cassiopeia A, is vermoedelijk zo'n geëxplodeerde ster. (Het gebruik is ontstaan, een radiobron te noemen naar het sterrenbeeld waarin hij zich bevindt, en verder met een Latijnse letter in volgorde van ontdekking.)

Nog een andere identificeerbare, vaak ook optisch zichtbare, bron van continue radiostraling is het geïoniseerde waterstofgas in het Melkwegvlak.

Men neemt ook straling waar die komt van andere melkwegstelsels, waarvan de Andromedanevel een bekend voorbeeld is. De sterke bron

---

[2]) Een goed overzicht geeft het boek: J. L. Pawsey en R. N. Bracewell, Radio Astronomy, Oxf. Univ. Press, Oxford 1955. Zie verder, vooral wat betreft apparaturen voor radioastronomie: Proc. Inst. Radio Engrs., special issue, jan. 1958.

[3]) G. Reber en G. R. Ellis, J. geophys. Res. **61**, 1, 1956. Het betreft hier een straling door zg. vrij-vrij-overgangen. De vrije elektronen, die zich eenparig voortbewegen, veroorzaken geen straling. Komt zo'n elektron in de buurt van een proton, dan wordt het afgeremd, wat straling veroorzaakt. Na de afbuiging vermindert de invloed van het proton weer en wordt het elektron opnieuw vrij. De theorie van deze vrij-vrij-overgangen is uitgewerkt door Kramers.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fig. 2. De Krabnevel, het restant van een „supernova", waarvan Chinese astronomen in 1054 het opvlammen hebben waargenomen en die thans als een bron van sterke radiostraling geïdentificeerd is. 1 mm van deze afbeelding is 2,3 boogseconden. — De opname is gemaakt met de 100-inch-telescoop in Californië, blauw filter (0,31-0,50 μ), belichtingstijd 1 uur.

Cygnus A werd geïdentificeerd met een extragalaktisch object waarvan men aanneemt dat het twee melkwegstelsels in botsing zijn.

Het mechanisme waardoor de straling ontstaat, is nog lang niet voor alle gevallen bekend. Bij de Krabnevel heeft men eerst optisch, en daarna ook op 3 cm golflengte, een lineaire polarisatie van de ontvangen straling gevonden. Men neemt derhalve aan dat men in dit geval met zg. synchrotronstraling te maken heeft: straling van elektronen die bijna met lichtsnelheid in spiraalbanen rond de krachtlijnen van een magnetisch veld lopen. Dit mechanisme speelt ook op andere plaatsen een rol. Hoe de elektronen hun energie krijgen en hoe het magnetische veld ontstaat, is nog onverklaard.

Wanneer men een vermoeden wil uitspreken over de oorzaak van de radiostraling van een bepaalde bron, is het gewenst de frequentieafhankelijkheid ervan te vergelijken met die welke uit het theoretisch onderstelde mechanisme volgt. Het is dus nodig in allerlei delen van het spectrum metingen te doen. De radioastronomen, die onderling zeer nauw contact houden, trachten duplicatie te vermijden en kiezen hun onderdeel van het frequentiespectrum zoveel mogelijk als aanvulling van reeds bekende gegevens. Dit leidde ertoe dat, toen in Nederland de mogelijkheid ontstond met de paraboolantenne van 25 m diameter te Dwingeloo metingen te doen, daarvoor het gebied van 400 MHz werd gekozen. De mogelijkheid om voor dit gebied een goede ontvanger te construeren, was bij deze keuze natuurlijk ook van invloed. Bovendien was de relatief hoge frequentie van 400 MHz aantrekkelijk omdat de achtergrondstraling met stijgende frequentie sneller in sterkte afneemt dan de straling van sommige afzonderlijke bronnen. Bij 400 MHz be-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

ginnen deze bronnen zich daardoor duidelijker tegen de achtergrond af te tekenen, mede doordat de bundelbreedte van de antenne bij zo'n hoge frequentie heel klein wordt.

Antennes voor de ontvangst van de radiostraling

Bij de waarnemingen met onze ontvanger is gebruik gemaakt van de volgende antennes (zie *fig. 3*): a) een Duitse, na de oorlog in Nederland achtergebleven, parabolische radarspiegel van 7,5 meter diameter; b) een hoornantenne voor de ijking (zie hieronder); c) de grote parabolische spiegel van 25 meter diameter die in de jaren 1954-1956 in Dwingeloo is gebouwd [4]), zie *fig. 4*.

De stralingsbundel, opgevangen door een parabolische reflector, heeft een openingshoek die van de golflengte λ en de diameter d van de reflector ruwweg afhangt volgens de formule:

$$\varphi = 70\ \lambda/d\,.$$

(φ in graden, λ en d in gelijke maat; deze openingshoek is aldus gedefinieerd dat bij de hoek $\frac{1}{2}\varphi$ vanaf de bundelas de intensiteit tot de helft is gedaald.) Bij overgaan tot een grotere reflector zal men dus evenredig meer detail kunnen onderscheiden. De 25-m-spiegel heeft bij 75 cm golflengte (400 MHz) een bundelbreedte van slechts 2,1°.

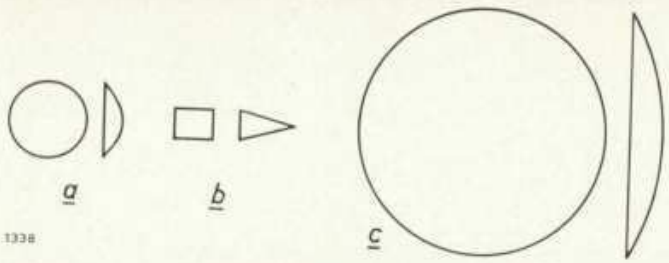


Fig. 3. Schets van de drie antennes die bij het werken met de beschreven ontvanger zijn gebruikt: *a*) parabolische radarspiegel van 7,5 m diameter, *b*) hoornantenne, *c*) grote, beweegbare, parabolische spiegel van 25 meter diameter, gebouwd in de jaren 1954 tot 1956 te Dwingeloo.

Deze spiegel was, toen hij in 1956 in gebruik genomen werd, de grootste beweegbare spiegel ter wereld, en hij behoort ook thans nog tot de grootste: alleen de inmiddels voltooide spiegel van Jodrell Bank bij Manchester, met 75 meter diameter, is groter. De metingen in Dwingeloo beloofden dus een relatief zeer nauwkeurig beeld van de radiohemel te zullen leveren.

Wanneer men nog nauwkeuriger wil meten dan met grote beweegbare spiegels mogelijk is, gaat men over tot zg. interferometeropstellingen. Hiermee heeft Ryle in Cambridge veel ervaring opgedaan, en in Australië Mills en Christiansen. De opstelling van Mills bevat twee onderling loodrechte horizontale rijen dipoolantennes („kruisantenne"). Men heeft reeds systemen van deze soort gemaakt waarbij de rijen dipolen 500 meter lang zijn; de bundelbreedte hiervan is 0,9° bij een golflengte van 3 meter. De Nederlandse radioastronomen hebben in samenwerking met die van andere Westeuropese landen een plan in studie voor een nog veel uitgebreider kruis, waarbij men aan een lengte van enige kilometers denkt. Een nadeel is natuurlijk dat men zulke antennes niet op ieder punt van de hemel kan richten, maar moet wachten op momenten waarop interessante punten door de nauwe, slechts in zeer geringe mate beweegbare, bundel heen bewegen.

De ijking van een grote antenne, d.w.z. het herleiden van het ontvangen signaal tot de ontvangen energiestroom (fluxdichtheid), is moeilijk [5]). Omdat voor hoornantennes het ontvangen signaal als functie van de fluxdichtheid zowel theoretisch als experimenteel veel beter bekend is, werd voor de hieronder te bespreken absolute ijking de bovengenoemde hoornantenne als hulpmiddel gebruikt.

Algemene beschouwingen over de ontvanger

Bij het ontwerpen van een ontvanger houdt men rekening met de aard en de sterkte van het te ontvangen signaal. De radiostraling die de astronoom wil ontvangen, heeft hetzelfde karakter als ruis, die ontstaat door de thermische beweging van elektronen in een weerstand, of door de ongelijkmatige emissie van de katode van een radiobuis. Verder wil de radioastronoom nog met zeer zwakke signalen kunnen werken. Terwijl men voor een goed omroepsignaal een veldsterkte van b.v. 1 mV/meter eist, of toch op zijn minst ca. 100 μV/m, wil de astronoom signalen aantonen die in amplitude een factor 100 000 zwakker zijn, overeenkomende met (over het ontvangen spectrum geïntegreerde) fluxdichtheden van de orde van 10^{-20} W/m^2. Dat die signalen bovendien hetzelfde karakter hebben als de eigen ruis van de ontvanger, maakt de zaak nog moeilijker. De eigen ruis in een (normale) ontvanger kan beantwoorden aan een temperatuur van de ingangsweerstand van verscheidene honderden of duizenden °K. Tegen deze achtergrond wil men een toeneming van ca. 1°, bijgedragen door een kosmische bron, nog kunnen constateren. Het is derhalve van kardi-

[4]) De Radiosterrenwacht te Dwingeloo, zes artikelen van H. C. van de Hulst; B. G. Hooghoudt; R. J. Schor; W. Huisman; B. B. Schierbeek; G. H. Jöbsis; De Ingenieur **69**, O1-O19, 1957.

[5]) De fluxdichtheid, uitgedrukt in watt/m^2 Hz, is de energie die, per seconde en per eenheid van bandbreedte, op 1 vierkante meter oppervlak van de antenne valt. Bij een uitgebreide bron kan men ook spreken over de helderheid, d.i. de fluxdichtheid gedeeld door de ruimtehoek waaronder men de bron ziet.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Fotomontage H. Kleibrink

Fig. 4. De 25-m-paraboolspiegel van de Radiosterrenwacht te Dwingeloo.

naal belang de eigen ruis van de ontvanger tot het uiterste te beperken, en voorts de versterking tijdens het aftasten van de hemel zeer constant te houden.

De belangrijkste principiële grenzen voor het reduceren van de eigen ruis blijken uit de volgende beschouwing. Na versterking van het signaal wordt het gedetecteerd. Het uitgangsvermogen I van de detector fluctueert, ook als het ingangsruissignaal

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

en de versterking constant zijn. De grootte van de fluctuatie wordt gegeven door:

$$\overline{(I-I_0)^2} = \frac{pI_0^2}{\tau \Delta f}, \quad \ldots \quad (1)$$

waarbij I_0 het gemiddelde uitgangsvermogen is, τ de tijdconstante en Δf de bandbreedte van de ontvanger, en p een constante van de orde van grootte 1, die nog enigszins van de frequentiekarakteristiek van de ontvanger en van de detectorkarakteristiek afhangt. Een te meten signaal moet ten minste een uitslag van de orde van grootte van deze fluctuaties geven.

Het is duidelijk, dat de fluctuatie (waarvoor $\sqrt{(I-I_0)^2}$ als maat kan dienen) evenredig is met het ruisniveau I_0. Bovendien weet men dat de variatie van een fluctuerende grootheid omgekeerd evenredig is met de wortel uit het aantal onafhankelijke „aflezingen" van deze grootheid; daardoor ontstaat de factor $\tau\Delta f$ in de noemer.

Blijkens verg. (1) zou men, door de tijdconstante τ en de bandbreedte Δf groter te kiezen, de onderste grens van de meetbare signalen steeds kunnen verlagen. Zo eenvoudig gaat dat echter niet. Bij grotere bandbreedte neemt de eigen bijdrage van de versterker tot de ruis sterker toe dan die van het te detecteren signaal, wegens de parabolische frequentieafhankelijkheid van het ruisgetal, zie hieronder. Bovendien wordt de kans op ontvangst van een storend signaal evenredig groter. Ook vergroting van de tijdconstante stuit op bezwaren. De tijdsduur, nodig voor één meting, wordt dan langer, en als men de hemel continu aftast, moet men de antenne langzamer laten bewegen [6]). Dit is zeer ongewenst als men metingen onderneemt die zich toch al over maanden of jaren moeten uitstrekken — zoals het nauwkeurig in kaart brengen van gedeelten van de hemel. Ook kan men bij een grotere waarde van de tijdconstante niet zo gemakkelijk zien of er misschien een enkele storingspiek is opgetreden, die een meetresultaat fout maakt. De vaststelling van bandbreedte en tijdconstante is dus een compromis. Men kan onze ontvanger naar keuze een bandbreedte van 10 of van 1 MHz geven, terwijl de tijdconstante naar omstandigheden gevarieerd kan worden van 0,1 tot 10 seconden. Voor sommige metingen vergroot men de waarnemingstijd, door de antenne een tijdlang op een zelfde punt gericht te houden en de geregistreerde intensiteit te middelen. Dit heeft hetzelfde effect als een zeer grote tijdconstante, maar men kan nu aan de registratie zien of zich een storingspiek heeft voorgedaan.

[6]) Vergelijk hiervoor het geheel analoge probleem van het continu registreren van een röntgendiffractiediagram: Philips techn. T. **17**, blz. 303 en volgende, 1955.

Alvorens op bijzonderheden van de ontvanger in te gaan, moeten we nog een enkel woord zeggen over de wijze waarop men de eigen ruis van een ontvanger bepaalt.

Het ruisgetal en de meting daarvan

De eigen bijdrage van een ontvanger tot het ruisniveau wordt uitgedrukt door het ruisgetal. Dit getal, F, is de factor die aangeeft hoeveel maal het uitgangsruisvermogen groter is dan dat van een ideale ontvanger (die zelf géén ruisbijdrage geeft) wanneer alleen de ingangsweerstand, op een standaardtemperatuur T_0, is aangesloten. Als waarde van de ingangsweerstand kunnen we b.v. kiezen de golfweerstand van de aansluitkabel waarop de ontvanger gewoonlijk moet werken, d.i. 50 ohm. Het ruisvermogen dat door een weerstand wordt afgegeven, is evenredig met zijn temperatuur T. We zouden dus ook kunnen zeggen: ten gevolge van de ruisbijdrage van de ontvanger lijkt het of de ingangsweerstand een temperatuur $F \times T_0$ heeft. Men heeft dus een schijnbare temperatuurverhoging $(F-1)T_0$ als gevolg van de ontvangerruis.

Dit leidt direct tot een van de methodes om het ruisgetal te meten [7]). Men meet het uitgangsruisvermogen P_1 met de ingangsweerstand op temperatuur T_1, en herhaalt deze meting bij een andere temperatuur T_2, waarbij dat ruisvermogen P_2 blijkt te zijn. Dan geldt:

$$P_1 = a\{(T_1 + (F-1)T_0)\}, \quad \ldots \quad (2a)$$

$$P_2 = a\{(T_2 + (F-1)T_0)\}. \quad \ldots \quad (2b)$$

Als standaardtemperatuur T_0 wordt, in overeenstemming met de IRE Standards [8]), 290 °K gekozen. a is een constante, evenredig met de versterking van de ontvanger. Uit (2a) en (2b) elimineert men a, en het resultaat wordt:

$$F-1 = \frac{P_1T_2 - P_2T_1}{(P_2-P_1)T_0}. \quad \ldots \quad (3)$$

In de praktijk kan men aldus te werk gaan dat men achtereenvolgens meet met op de ingang van de ontvanger aangesloten een weerstand van 50 ohm op kamertemperatuur, en daarna met een weerstand welke 50 ohm is bij de temperatuur van vloeibare stikstof (77,5 °K). Tevoren is, op nog nader te bespreken wijze, de detectoruitslag uitgedrukt in het afgegeven vermogen.

[7]) Voor verschillende mogelijkheden om het ruisgetal te bepalen, zie b.v. N. van Hurck en F. L. H. M. Stumpers, Een automatische indicator van de ruisfactor, Philips techn. T. **18**, 122-125, 1956.

[8]) IRE Standards on electron tubes: Definitions of terms, Proc. Inst. Radio Engrs. **45**, 983-1009, 1957.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

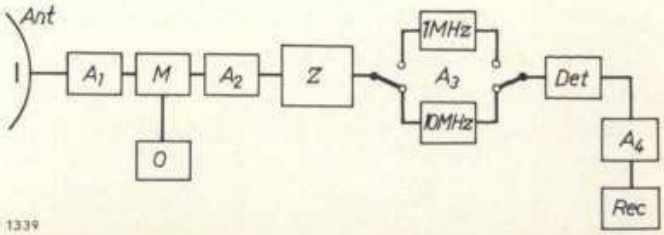
Heeft men het ruisgetal van de ontvanger eenmaal bepaald, dan kan men omgekeerd uit het gemeten uitgangssignaal de temperatuur van de ingangsweerstand afleiden. Dit geldt niet alleen voor een echte weerstand maar ook voor de stralingsweerstand van de antenne. De „antennetemperatuur" is (onder bepaalde voorwaarden) gelijk aan de temperatuur van de ruimte waarop de antenne gericht is, of, aangezien de temperatuur van die ruimte plaatselijk kan variëren: gelijk aan het gemiddelde van de temperatuur van de bestreken delen van de ruimte (waarbij elk deel met een gewichtsfactor overeenkomstig de grootte van zijn ruimtehoek en de richting in de antennebundel in rekening gebracht is: „gewogen" gemiddelde). Veelal is dit vrijwel de equivalente temperatuur van de straling uit de hoofdrichting van de antenne. De variatie over de hemel van deze temperatuur, die een maat voor de stralingsintensiteit is, is datgene wat de astronoom te weten wil komen.

Bijzonderheden van de ontvanger

De ontvanger heeft het karakter van een normale superheterodyneontvanger, met een middenfrequentie van 50 MHz. Als mengtrap fungeert een siliciumkristaldiode. Het blokschema van de gehele ontvanger is in *fig. 5* weergegeven. We behandelen nu achtereenvolgens enkele bijzonderheden, met name de hoogfrequentieversterker, enige maatregelen ter stabilisatie van de versterking, en de detector.

De hoogfrequentieversterker

De meest geschikte schakeling voor de hoogfrequentieversterker is de cascodeschakeling [9]), die zowel leidt tot een klein ruisgetal als tot een grote versterking en een grote stabiliteit (geen neiging tot oscilleren). Bij deze schakeling wordt de katode van een versterkbuis waarvan het rooster geaard is, voor hoogfrequentie verbonden met de anode van een voorafgaande buis. De beste buis op beide plaatsen in deze schakeling is, voor het gewenste frequentiegebied, de schijftriode EC 57 [10]), dank zij de uiterst korte en constante looptijden der elektronen en de hoge fractie van de verzadigingsemissie die men bij een L-katode nuttig kan gebruiken. De versterking van twee buizen EC 57



1339

Fig. 5. Blokschema van de ontvanger. *Ant* antenne. A_1 hoogfrequentieversterker. *O* lokale oscillator. *M* mengtrap (siliciumdiode). A_2 middenfrequentie-voorversterker. *Z* geijkte, in stappen van 1 dB instelbare, verzwakker (zie hierover in het hoofdstuk IJking). A_3 middenfrequentieversterkers, met twee verschillende bandbreedten naar keuze. *Det* detector. A_4 gelijkspanningsversterker, met regelbare tijdconstante. *Rec* registreerinstrument.

in cascode bedraagt bij 400 MHz ca. 36 dB. Deze grote versterking brengt mee dat de volgende trap, de mengtrap, slechts een geringe bijdrage tot het ruisgetal geeft.

Het ruisgetal van een versterker met verscheidene trappen wordt gegeven door:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \ldots + \frac{F_k - 1}{G_1 G_2 \ldots G_{k-1}} + \ldots, \quad (4)$$

indien F_k het ruisgetal van de k^e trap alleen is, en G_k de beschikbare vermogensversterking van die trap. Hierbij is ondersteld dat de *F*- en *G*-waarden binnen de bandbreedte van de ontvanger niet merkbaar van de frequentie afhangen.

De hoogfrequentieversterker is nader geschetst in *fig. 6*. Het antennesignaal wordt via een coaxiale kabel van 50 ohm toegevoerd aan de versterkeringang. Hier zorgt een impedantietransformator [11]) (T_1) ervoor dat de ingangsimpedantie van de eerste buis (B_1), waarvan het ruisgetal in hoge mate blijkt af te hangen, op de gunstigste waarde kan worden ingesteld. Het signaal arriveert nu op het rooster van de eerste buis, waarvan de katode hoogfrequent geaard is. De katode van de tweede buis is verbonden met de anode van de eerste. De parasitaire capaciteit van dit punt ten opzichte van aarde, die een kortsluiting voor de hoogfrequente anodestroom van de eerste buis zou vormen, wordt onschadelijk gemaakt door afstemming met behulp van een lechersysteem, T_2. (De twee in fig. 6 zichtbare binnengeleiders in T_2 vormen voor dit doel samen slechts een enkele geleider, daar zij aan het begin verbonden zijn. De uitvoering in dezelfde vorm als de impedantietransformator T_1 is hier alleen gekozen omdat ze het toevoeren van de nodige gelijkspanningen aan de elektrodes — die daardoor immers niet hoogfrequent kortgesloten mogen worden — vergemakkelijkt.) Op analoge wijze wordt de anode-roostercapaciteit van de eerste buis onschadelijk gemaakt, door middel van een eenvoudig

[9]) Ingevoerd en geanalyseerd door H. Wallman, A. B. MacNee en C. P. Gadsden, A low-noise amplifier, Proc. Inst. Radio Engrs. **36**, 700-708, 1948.

[10]) G. Diemer, K. Rodenhuis en J. G. van Wijngaarden, De EC 57, een schijftriode voor microgolven met L-katode, Philips techn. T. **11**, 321-328, 1956. De daar beschreven en voor onze ontvanger ook toegepaste buis EC 57 is naderhand vervangen door het type EC 157, waarvan de katode een langere levensduur heeft. — Over de ruis van triodes bij hoge frequenties in het algemeen, zie: G. Diemer en K. S. Knol, Philips techn. T. **14**, 175, 1952.

[11]) K. S. Knol en J. M. van Hofweegen, A universal adjustable transformer for U.H.F. work, Philips Res. Repts. **3**, 140-155, 1948.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

spoeltje, L, afstembaar met een verschuifbare kern (van verzilverd messing, ter beperking van wervelstroomverliezen). Dit is een variant van de bekende neutrodynisatie, die hier echter niet als doel heeft het voorkómen van genereren, daar de spanningsversterking van de eerste buis daarvoor toch te klein is (slechts = 1). Het doel is veeleer om, mede door de genoemde afstemming met T_2, aan de tweede buis een hoge ingangsimpedantie te geven, die, zoals de experimenten hebben geleerd, gewenst is om de ruisbijdrage van de buis klein te houden. In de anodeketen van de tweede buis zorgt weer een impedantietransformator (T_3 in fig. 6) voor de juiste aanpassing op de kabel van 50 ohm waarmee men het signaal toevoert aan de mengtrap.

Door de schakeling van twee triodes in cascode wordt een geheel verkregen dat de gunstige eigenschappen heeft van een pentode, maar zonder het aan de pentode klevende nadeel van de stroomverdelingsruis. Terwijl bij een pentode het schermrooster de koppeling tussen ingangs- en uitgangsschakeling beperkt (en daardoor de neiging tot oscilleren onderdrukt), gebeurt dit in de cascode door het rooster van de tweede buis (waar géén stroomverdeling optreedt). En ten opzichte van een schakeling met een enkele triode met geaard rooster heeft de cascodeschakeling het, voor de pentode typische, voordeel van een veel hogere versterking: de voor een klein ruisgetal gewenste hoge katode-impedantie, die men aan de enkele triode zou moeten geven, leidt daar tot tegenkoppeleffecten, die aan een grote versterking in de weg staan.

Het ruisgetal dat gevonden werd indien voor de eerste buis EC 57 een uitgezocht exemplaar werd gebruikt, is als functie van de afstemfrequentie uitgezet in *fig.* 7. Bij 400 MHz was $F = 2{,}5$. Bij meting van ca. 30 buizen werd voor deze frequentie een gemiddelde waarde gevonden van $F = 2{,}9$, met een spreiding van $\pm$ 0,3. De in de figuur eveneens uit-

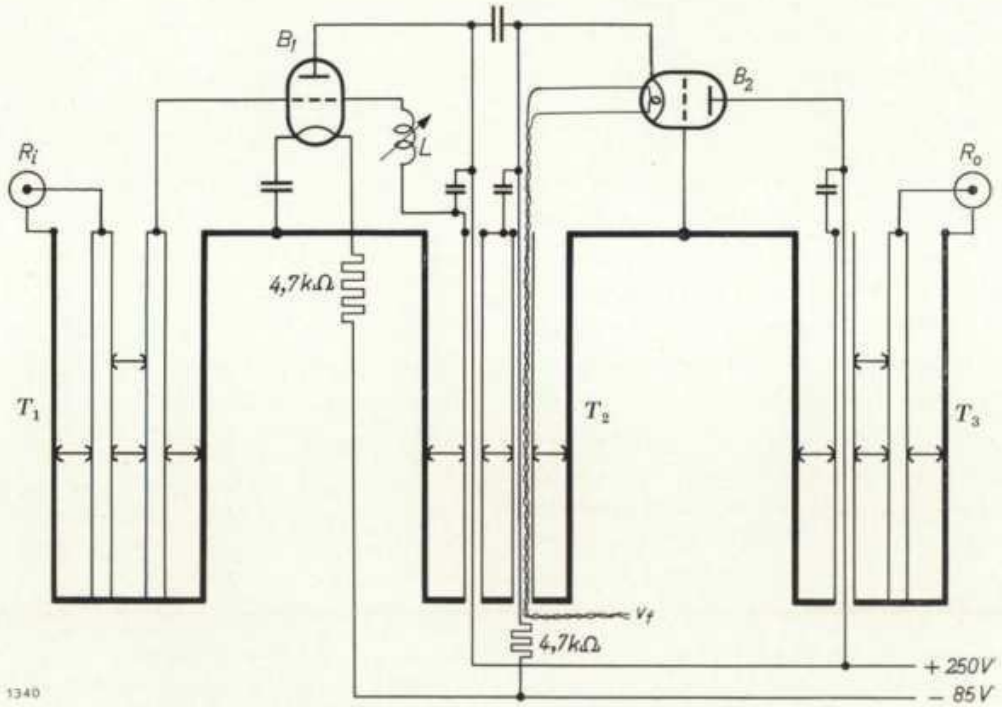


Fig. 6. Schema van de hoogfrequentieversterker. B_1 en B_2 twee schijftriodes EC 57. R_i coaxiale kabel van 50 ohm golfweerstand, die als ingangsweerstand fungeert. T_1 aanpassingstransformator, uitgevoerd als een soort lechersysteem met twee verschuifbare kortsluitbruggen. T_2 lechersysteem voor het afstemmen van de parasitaire capaciteit tussen de katode van B_2 en aarde; gemakshalve is dezelfde constructie gebruikt als voor T_1. L spoeltje met verschuifbare kern voor neutrodynisatie. T_3 aanpassingstransformator, voor een 50-ohm-kabel R_o die als uitgangsweerstand fungeert. De katode van beide buizen krijgt via een weerstand van 4,7 kΩ een negatieve spanning; door keuze hiervan wordt de gewenste anodestroom (20 mA) ingesteld.

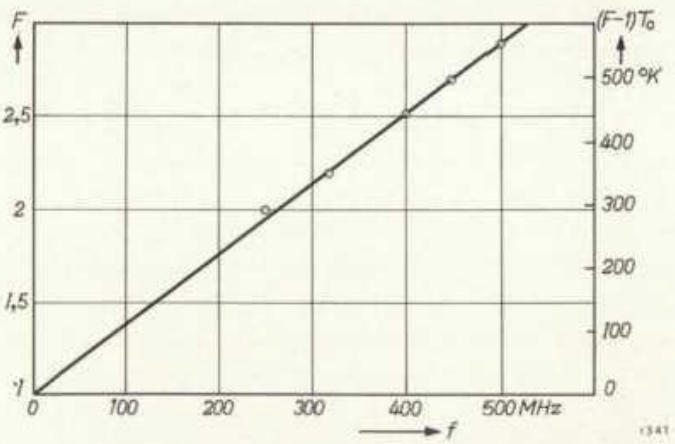


Fig. 7. Ruisgetal F van de ontvanger, verkregen met een uitgezochte buis EC 57 als eerste hoogfrequentieversterkbuis (B_1 in fig. 6; deze buis bepaalt nagenoeg de gehele eigen ruis van de ontvanger, waarvoor F een maat is). Uitgezet is $F-1$ als functie van de afstemfrequentie f in MHz. Bij 400 MHz is $F = 2{,}5$. De gemeten punten liggen met goede benadering op een rechte lijn met de vergelijking: $F - 1 = 0{,}377 \times f/100$. Rechts is de schaal $(F-1)T_0$ bijgetekend, d.i. de antennetemperatuur, equivalent met de eigen ruis van de ontvanger.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gezette temperatuur $(F-1)T_0$ komt, zoals hierboven reeds is vermeld, overeen met de achtergrond waartegen een uit de wereldruimte ontvangen signaal moet afsteken. Bij het genoemde ruisgetal $F = 2{,}5$ behoort een waarde $(F-1)T_0 = 435$ °K. Met behulp van verg. (1) volgt hieruit dat, bij een bandbreedte van 10^7 Hz en een tijdconstante van 10 sec, een temperatuurbijdrage van $\sqrt{435^2/(10\times10^7)} \approx 0{,}05$ °K van de antenne nog aan te tonen is.

De onderste grens van het frequentiegebied waarin de beschreven ontvanger gebruikt kan worden, wordt bepaald door de beperkte lengte (0,50 m) van de gebruikte lechersystemen: afstemming is niet mogelijk beneden ca. 200 MHz. De bovenste grens van het frequentiegebied wordt bepaald door de neutrodynisatie: de toegepaste simpele wijze van neutrodyniseren werkt goed tot ruim 500 MHz. Met wat gecompliceerder hulpmiddelen zou men waarschijnlijk wel tot 700 à 800 MHz kunnen komen.

De afstemming met de lechersystemen is zo scherp dat het binnenkomende signaal met de „gespiegelde" frequentie — dat door de menging in de mengtrap eveneens in de middenfrequentieband terechtkomt — met 45 dB wordt verzwakt ten opzichte van het gewenste signaal.

Het instellen van de hoogfrequentieversterker geschiedt door eerst alle variabelen in te stellen op maximale versterking, met een signaal uit een meetzender. Vervolgens wordt de eerste trap ingesteld voor minimaal ruisgetal door variatie van de impedantietransformator T_1, de neutrodyneschakeling, en de afstemming in de eerste anode (T_2). Hierbij is de vroeger in dit tijdschrift beschreven automatische ruisgetalindicator [7]) een vrijwel onmisbaar hulpmiddel. Men ziet hiermee nl. onmiddellijk het effect van elke verandering, terwijl men anders een vrij omslachtige meting zou moeten uitvoeren.

Speciale stabilisatiemaatregelen

Wij hebben eerder reeds opgemerkt dat de versterker zeer stabiel moet zijn, om te voorkomen dat toevallige variaties in de versterking worden aangezien voor veranderingen in het ontvangen ruisvermogen. Fluctuaties in de netspanning worden onschadelijk gemaakt door een netspanningsstabilisator, die $\pm$ 20 volt variatie reduceert tot een verandering van minder dan 0,1% in de voedingsspanning. De hieruit verkregen gelijkspanningen voor de instelling van de buizen worden tot op 1:10^5 constant gehouden met behulp van een versterker die als referentie een standaardelement gebruikt. In alle versterktrappen zijn grote katodeweerstanden gebruikt, waardoor de gelijkstroominstelling van de buizen goed vastligt. Ook de eigenschappen bij hoge frequenties blijken daarmee voldoende vast te liggen. Er is een speciale detector toegepast, die de eigenschap heeft dat het te meten niveau niet van invloed is op de bandbreedte en de versterking van de voorafgaande versterkbuis (zie hieronder). Bovendien houden we, om temperatuureffecten te vermijden, de omgevingstemperatuur zo goed mogelijk constant.

Speciale aandacht is besteed aan de instelling van de hoogfrequentieversterker. Na instelling op minimaal ruisgetal werd nagegaan in hoeverre het ruisgetal nog van de instelspanningen afhangt. Wanneer men de anodespanning van een buis EC 57 geleidelijk verhoogt, treedt tussen 60 en 160 volt een sterke daling van het ruisgetal op; daarboven is het effect gering (*fig. 8*). Voor een gunstig ruisgetal werd een

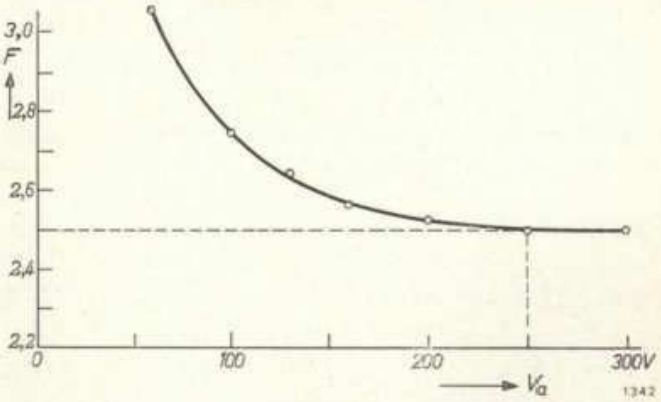


Fig. 8. Variatie van het ruisgetal als functie van de anodegelijkspanning V_a van B_1. Bij variatie van V_a bleek vrijwel geen verandering van de afstemming met T_2 (zie fig. 6) nodig te zijn. Gekozen werd $V_a = 250$ V.

anodespanning van 250 volt voldoende geacht. Vervolgens werd bij 250 volt gemeten hoe het ruisgetal varieert als functie van de anodestroom (*fig. 9*). Het blijkt dat het minimum, dat bij 20 mA ligt, vrij vlak verloopt, zodat de invloed van anodestroomvariaties gering is. Nu kan men zich afvragen of bij deze

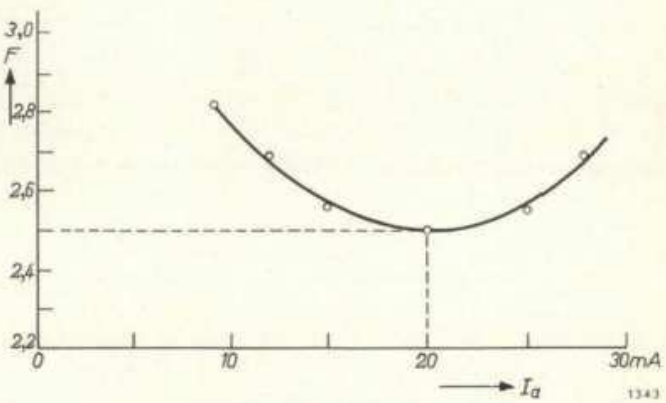


Fig. 9. Variatie van het ruisgetal als functie van de anodegelijkstroom I_a. Instelling op $I_a = 20$ mA blijkt het gunstigst te zijn, het minimum is echter vrij vlak.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

instelling het ruisgetal nog sterk afhangt van de gloeispanning. Dit blijkt echter niet het geval te zijn (*fig. 10*).

Er is hierboven reeds vermeld dat de bandbreedte van de ontvanger, die normaal 10 MHz bedraagt, desgewenst tot 1 MHz teruggebracht kan worden

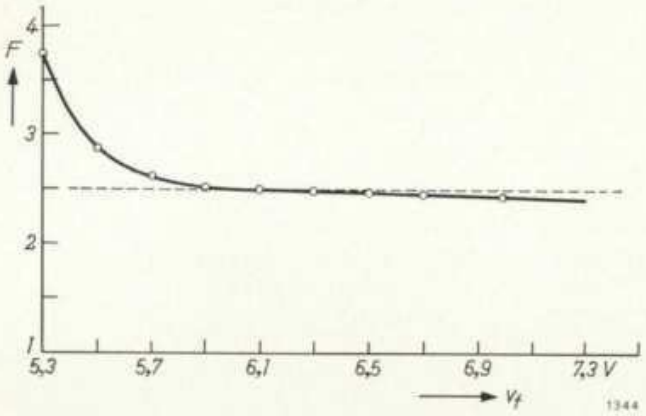


Fig. 10. Variatie van het ruisgetal als functie van de gloeispanning v_f.

(nl. door inschakelen van een extra-bandfilter, zie fig. 5), wanneer storingen dit wenselijk maken. Men zou kunnen verwachten dat het ruisgetal bij 1 MHz bandbreedte merkbaar kleiner is dan bij 10 MHz, aangezien het ruisgetal met toenemende (positieve of negatieve) frequentieafwijking ten opzichte van de afstemfrequentie oploopt [9]). Het minimum, waarop men ingesteld heeft, is echter bij deze parabolische functie zeer vlak, zodat het verschil voor 5 MHz frequentieafwijking nog geen rol van betekenis speelt.

Terwijl de ontvanger op zichzelf geschikt is voor het frequentiegebied van 200 tot 500 MHz, wordt hij voor de radioastronomische metingen uitsluitend gebruikt op een vaste frequentie, van 400 MHz. Daardoor kon de frequentie van de lokale oscillator worden gestabiliseerd met behulp van een kwartskristal. Dit kristal trilt met een frequentie van 29,17 MHz; door verdrievoudigen en twee maal vertweevoudigen wordt de gewenste frequentie van 350 MHz verkregen. Voor de laatste frequentievermenigvuldiging, waar een tamelijk groot vermogen op de hoge frequentie van 350 MHz nodig is, wordt een kleine zendbuis gebruikt, nl. een QQE 02/5.

De getroffen maatregelen hebben tot een zeer stabiele ontvanger geleid.

Een bekende methode om het effect van versterkingsfluctuaties nog verder te verkleinen, is het voortdurend snel omschakelen tussen een bekende ruisbron en die welke men wil meten (zie [1])). Men verliest dan, tenzij men met twee ontvangers zou werken, de helft van de waarnemingstijd. Van deze complicatie is daarom hier afgezien.

De detector

Bij het ontwerp van de ontvanger is ernaar gestreefd dat tot aan de detector toe volledige lineariteit gehandhaafd blijft, en wel voor een zeer groot gebied van signaalamplitudes. Niet-lineaire vervorming van het ruissignaal, b.v. door afsnijden van de toppen, zou tot foutieve relatieve intensiteitswaarden leiden. Daarom is ook een detector van het zg. type met constante impedantie gekozen [12]) (*fig. 11*), waardoor de laatste trap van de middenfrequentieversterker — in tegenstelling met wat bij de normale diode-detectie optreedt — geen wisselende belasting ondervindt wanneer de signaalamplitude sterk varieert. Om dezelfde reden is voor de laatste middenfrequentietrap niet de voor bredebandversterkers gebruikelijke 1,5-watt-buis gekozen, doch een buis E 81 L, die een vermogen van 6,5 watt heeft en een sinusvormige uitgangsspanning tot 30 V levert zonder noemenswaardige distorsie. Weliswaar bedraagt de effectieve waarde van het signaal dat de detector te verwerken krijgt, bij de sterkste astronomische objecten niet meer dan 3 V, zoals voor detectie gebruikelijk is. Door het ruiskarakter van het signaal komen echter bij dit niveau veel hogere momentele waarden aan de uitgang van de middenfrequentieversterker voor: de amplitude 12 V treedt b.v. gedurende 0,01% van de tijd op.

De detectorspanning wordt aan de registrerende meter toegevoerd via een gelijkspanningsversterker, die gestabiliseerd is door tegenkoppeling en door periodieke omschakeling op een referentiesignaal [13]).

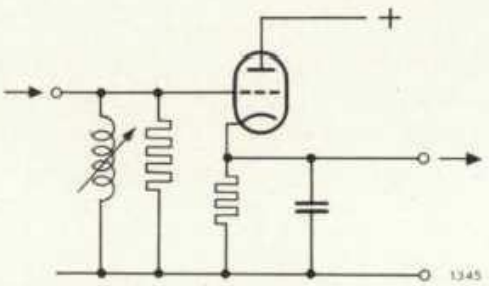


Fig. 11. Schema van de detector (zg. type met constante impedantie). De anodestroom is door de werking van de *RC*-keten een maat voor de over enige periodes gemiddelde amplitude van de signaalspanning, die aan het rooster wordt toegevoerd (anode-detectie). Daar er vrijwel geen roosterstroom vloeit, wordt de voorgaande trap niet belast en blijft de lineariteit van de versterking tot piekspanningen van b.v. 30 V gehandhaafd.

Deze versterker dient niet alleen voor het verkrijgen van een geringe uitgangsweerstand, ter aanpassing bij het registreerinstrument, maar vooral om de mogelijkheid te verschaffen het nulpunt van de

[12]) W. K. Squires en R. A. Goundry, Electronics **25**, april 1952, blz. 109.

[13]) S. Landsberg, A general-purpose drift-free D.C. amplifier, Philips Res. Repts. **11**, 161-171, 1956.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

schaal ver buiten het afleesgebied van de meter of de registreerstrook te doen vallen: de variaties van het signaal kunnen aldus tot 100× vergroot worden geregistreerd. Bovendien is het een eenvoudige zaak de tijdconstante van de gelijkspanningsversterker variabel te maken. Zo is de bovenvermelde instelbaarheid van de tijdconstante van de ontvanger tussen 0,1 en 10 sec verkregen.

In *fig. 12* is een foto van de gehele ontvanger weergegeven.

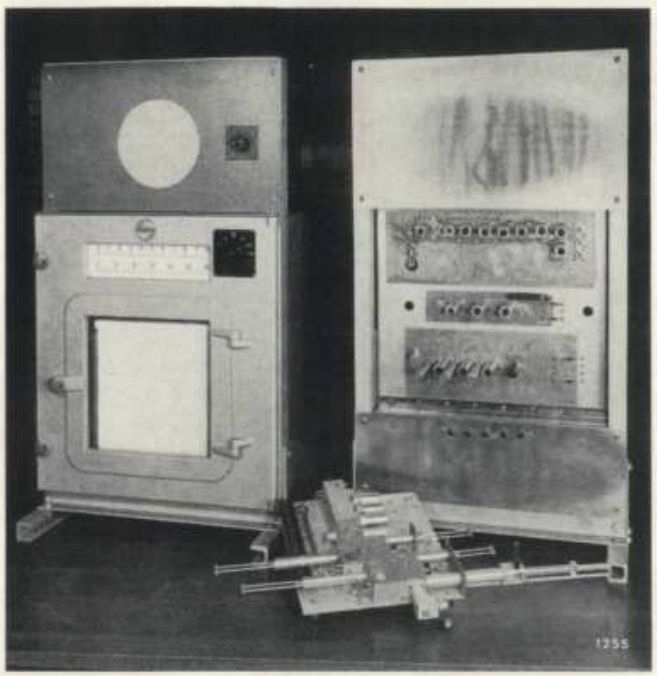


Fig. 12. De volledige ontvanger. Op de losse plaat vooraan bevinden zich de hoogfrequentieversterker (iets anders uitgevoerd dan in de tekst beschreven, maar niet wezenlijk verschillend), de mengdiode en de middenfrequentie-voorversterker. Dit gedeelte wordt gemonteerd in het centrum van de parabolische spiegel (fig. 4), waar de mast is bevestigd die aan zijn andere einde, in het brandpunt van de spiegel, de eigenlijke antenne (een soort hoorn) draagt en waardoor de coaxiale verbindingskabel loopt. Op het rechterrek de voedingsapparatuur, de detector met gelijkspanningsversterker, en de beide middenfrequentieversterkers (voor resp. 10 en 1 MHz). Links het registreerinstrument en een controleluidspreker.

IJking van de ontvanginstallatie

Tot de ijking van de ontvanger kunnen we een aantal nogal uiteenlopende bewerkingen rekenen: de meting van het ruisgetal van de ontvanger, de bepaling van de „detectorfunctie" (verband tussen de uitgangsspanning van de detector en het aan de ingang van de ontvanger als signaal toegevoerde ruisvermogen) en de ijking van de antenne.

Meting van het ruisgetal

Het principe van de meting van het ruisgetal hebben we hierboven reeds beschreven, we gaan hier wat nader in op een enkel, nogal ongewoon, detail van de uitvoering. Voor de meting willen we een weerstand van 50 ohm op de ingang aansluiten, die eerst op kamertemperatuur gebracht wordt en dan op de temperatuur van vloeibare stikstof. Een zuivere weerstand, zonder zelfinductie of capaciteit, is bij een frequentie van 400 MHz alleen goed te realiseren als coaxiale weerstand. Echter kan niet iedere coaxiale weerstand het verdragen om in vloeibare stikstof gedompeld te worden. Meestal komen dergelijke weerstanden na elke cyclus van afkoelen en weer opwarmen niet precies op dezelfde weerstandswaarde terug. Een coaxiale weerstand die hierbij reproduceerbare resultaten geeft, werd als volgt geconstrueerd. Een keramische staaf wordt aan één eind bedekt met een dun laagje metaal, met een weerstand van 50 ohm bij een lengte van ca. 15 mm. Het laagje metaal is een mengsel van goud en platina, dat wordt bereid uit een vloeistof, in de handel onder de naam „Zilverglans" (Regout, Maastricht). De vloeistof wordt met een penseel aangebracht en vervolgens gebakken. Daarna wordt de keramische staaf verder met zilver bedekt. Hij kan nu de binnengeleider van een coaxiaal systeem vormen, dat zijn voortzetting vindt in de coaxiale kabel naar de ontvanger. De buitengeleider wordt gevormd door een koperen buis van zodanige afmetingen dat de golfweerstand 50 ohm wordt. Ter plaatse van het weerstandslaagje verloopt de buisdiameter geleidelijk (*fig. 13*), en aan het einde, bij *a*, worden binnen- en buitengeleider aaneengesoldeerd. Door het geleidelijk verlopen heeft men als het ware op elk punt een aanpassing aan het nog resterende stukje van de ohmse weerstand.

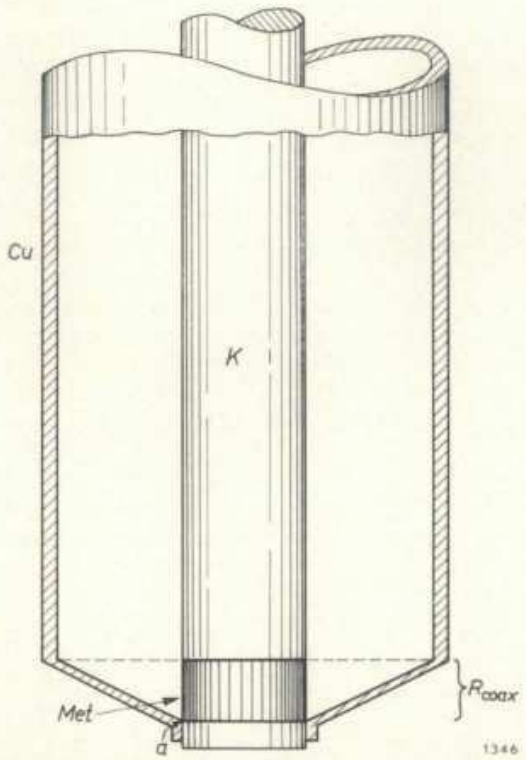


Fig. 13. Constructie van de coaxiale weerstand, R_{coax}, geschikt voor onderdompeling in vloeibare stikstof. *Cu* koperen buitengeleider. *K* verzilverd keramisch staafje, dat aan het eind is bedekt met een speciaal metaallaagje *Met*.

De gelijkheid van de afgekoelde weerstand met een op kamertemperatuur gehouden coaxiale weerstand wordt met een admittantiemeter gecontroleerd. Mocht er een klein verschil bestaan, dan kan men de weerstand welke zich op kamertemperatuur bevindt, met behulp van een impedantietransformator, als bij de hoogfrequentieversterker beschreven [11]), precies gelijk maken aan de andere. (Men past deze transformatie toe op de weerstand op kamertemperatuur, omdat verliezen bij de trans-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

formatie beschouwd moeten worden als in de totale weerstandswaarde verdisconteerde weerstandsbijdragen die ook kamertemperatuur hebben.)

De detectorfunctie

Voor het bepalen van de detectorfunctie — die trouwens reeds bekend moet zijn voor de meting van het ruisgetal — is een geijkte verzwakker in de middenfrequentieversterker ingebouwd; zie fig. 5. Dit is een bredebandverzwakker, aan beide zijden afgesloten met 50 ohm. Hij bevat vijf trappen, van resp. 1-2-3-4-10 dB verzwakking, die door middel van drukknoppen in werking gesteld kunnen worden, zodat men een verzwakking tot 20 dB in stappen van 1 dB kan inschakelen. De verzwakker is in het Naval Research Laboratory te Washington, D.C. (Verenigde Staten), gecontroleerd; de afwijking van de nominale verzwakking bleek in geen geval groter te zijn dan 0,1 dB.

Zonder ingangsspanning, dus alleen door de eigen ruis van de ontvanger, leverde de detector bij een bepaalde instelling van de apparatuur een gelijkspanning van 0,966 V, met de verzwakker op 0 dB. Schakelen we nu 1 dB verzwakking in en voeren we een ruissignaal van zodanige sterkte toe dat weer dezelfde meteruitslag verkregen wordt, dan blijkt na teruggaan tot verzwakking 0 dB de gelijkspanning 1,173 V te bedragen. Op deze wijze verdergaande werd *tabel I* verkregen.

Tabel I. De met behulp van de geijkte verzwakker bepaalde detectorfunctie: uitgangsgelijkspanning E als functie van het ingangsruisvermogen a.

Toegevoerd ingangsruisvermogen a dB	Equival. temperatuur van ingangsweerstand °K	Gelijkspanning E aan uitgang V	Afwijking x ten opzichte van verg. (5) mV	Grafische interpolatie van x
0	290	0,966	+ 16	
1	365	1,173	+ 7	
2	460	1,413	— 1	
3	579	1,692	— 8	
4	728	2,034	+ 4	
5	917	2,421	+ 11	
6	1155	2,84	— 6	
7	1452	3,34	0	
8	1830	3,91	0	
9	2310	4,55	0	
10	2900	5,30	+ 30	

De stappen van 1 dB zijn natuurlijk voor de radioastronomische metingen veel te grof. Men kan interpoleren met de, uit de tabel afgeleide, formule:

$$1000\,E = 950 + 202\,a + 13\,a^2 + a^3 . \quad . \quad . \quad (5)$$

De waarden van E in de tabel zelf vertonen ten opzichte van deze formule onregelmatige kleine afwijkingen x. Deze zijn te wijten aan afleesfouten in E of aan fouten in de verzwakker (fouten van 0,03 dB zijn al voldoende om de afwijkingen te verklaren). Voor de praktijk brengt men in de volgens (5) geïnterpoleerde waarden nog een correctie aan, verkregen door grafische interpolatie van de x-waarden (zie de figuur in de tabel).

IJking van de antenne

Met behulp van de detectorfunctie worden alle gemeten stralingssterkten herleid ten opzichte van een vast nulniveau, de eigen ruis van de ontvanger. Voor het bepalen van de absolute stralingssterkten, waarbij dus in hoofdzaak het straling vangend vermogen van de antenne nog als onbekende optreedt, is het voldoende de fluxdichtheid van één radioster in absolute maat nauwkeurig te kennen. Deze „ijking van de antenne" is noodzakelijk om resultaten van verschillende sterrenwachten met elkaar te kunnen vergelijken, en met name om metingen bij verschillende golflengten tot een betrouwbare spectrale verdeling te kunnen combineren; dit is immers, zoals in de inleiding is vermeld, van belang om theoretische voorstellingen omtrent het mechanisme van de straling te kunnen toetsen.

Als „ijkster" werd de reeds genoemde radiobron Cassiopeia A gekozen, die — afgezien van de korte golven, waar de zon het in sterkte wint — in het gehele radiospectrum het sterkste object aan de hemel is.

De ijking gebeurde in verschillende stappen. Uitgegaan werd van de eerder genoemde hoornantenne. Deze had de volgende afmetingen: aslengte 5,625 m (= 7,500 λ), verticale opening 3,028 m (= 4,038 λ) en horizontale opening 3,756 m (= 5,008 λ). Hieruit berekent men een versterking van 20,95 dB ten opzichte van de isotrope antenne [14]). Vervolgens werd de versterkingsfactor van de 7,5-m-spiegel bepaald, door hiermee en met de hoornantenne afwisselend een zelfde bron te meten (i.c. de zon); gevonden werd een versterking van 27,1 dB. Hierna kon de fluxdichtheid van Cassiopeia A worden gemeten met een eenvoudige interferometeropstelling, gebruik makend van de beide genoemde antennes, die op een onderlinge afstand van 20 λ waren ge-

[14]) S. A. Schelkunoff en H. T. Friis, Antenna theory and practice, Wiley, New York 1952.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

plaatst. De opgevangen stralingsbundel is bij deze opstelling zo nauw dat de meer continu verdeelde achtergrondstraling onschadelijk is, en de versterkingsfactor van het geheel is door de voorafgaande stappen bekend. Als resultaat werd gevonden een fluxdichtheid van $56{,}2\times10^{-24}$ W/m²Hz (antennetemperatuur ca. 800 °K; voor een nauwkeuriger beschrijving van de, hier slechts in grote trekken weergegeven meting, zie het in [15]) aangehaalde artikel in B.A.N. no. 472).

Bij het werken met de ontvanginstallatie wordt de antenne met geregelde tussenpozen, b.v. om het uur, op Cassiopeia A gericht om te controleren of de ontvanger niet verlopen is. De ontvanger is zo stabiel gebleken dat wekenlang geen bijstellen nodig is.

Enige radioastronomische resultaten, verkregen met de beschreven ontvanger

De beschreven ontvanger is, zoals in de inleiding werd vermeld, reeds enige jaren in gebruik bij de Stichting Radiostraling van Zon en Melkweg, meestal in Dwingeloo. In deze tijd hebben zich generlei moeilijkheden met de ontvanger voorgedaan. Verschillende resultaten, in samenwerking met de Sterrewacht van de Leidse Universiteit verkregen [15]), willen we hier in het kort vermelden.

Met behulp van de eerder genoemde 7,5-meterspiegel werd de partiële zoneclips van 30 juni 1954 waargenomen. Wegens sterke storingen door een naburige zender moest de bandbreedte beperkt worden tot 1 MHz (nauwkeuriger: 0,9 MHz), en om de invloed van impulsvormige storingen, zoals autoontstekingsstoringen, beter in het oog te kunnen houden, werd een tijdconstante van slechts 0,1 seconde in de detector gebruikt. De waarneming begon twee uur vóór de eclips en werd tot 1 uur daarnà voortgezet. De spiegel kon de zon niet automatisch volgen, maar werd elke twee minuten bijgeregeld. Een vergelijking van de waargenomen eclips met de geometrisch berekende ziet men in *fig. 14*. Door de gemeten punten kan een gladde curve worden getrokken met een fout van ten hoogste 1 schaaleenheid, behalve aan begin en eind, waar de fout 1½ schaaleenheid kan zijn. De zon was zeer

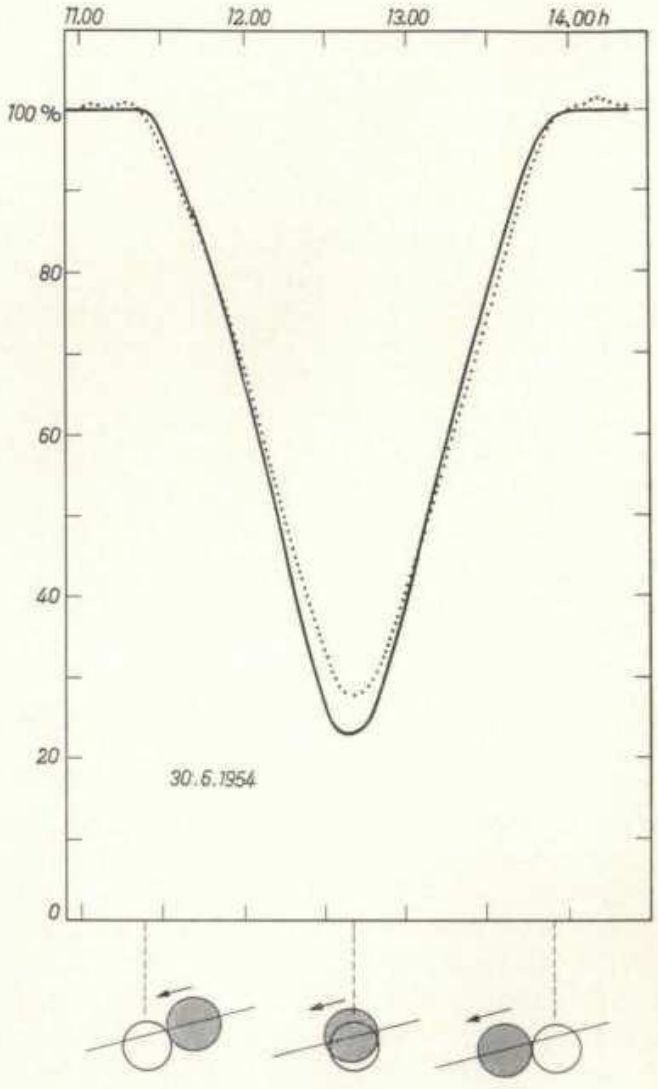


Fig. 14. Tijdelijke verandering van de zonnestraling op 400 MHz, in relatieve maat, gemeten tijdens de partiële zonsverduistering op 30 juni 1954 te Waalsdorp (stippels). De getrokken lijn is de geometrisch berekende eclipskromme (procentuele grootte van de zichtbare oppervlakte van de zon). Onderaan is de positie van de maan ten opzichte van de zon bij het begin, op het hoogtepunt en aan het eind van de eclips aangegeven. Vergelijking van de gemeten en de berekende stralingsintensiteiten leert dat de radiohelderheid van de zon niet geheel constant is over zijn oppervlak (zie het eerste in [15]) aangehaalde artikel).

rustig tijdens deze eclips. De voor de zonnediameter van ca. 30 boogminuten berekende gemiddelde helderheid van de zon kwam overeen met die van een zwart lichaam met een temperatuur van 6×10^5 °K, op de frequentie van 400 MHz. Bij deze meting werd het referentieniveau geleverd door een weerstand op kamertemperatuur, waarop ten minste eens per tien minuten werd overgeschakeld.

Een andere merkwaardige gebeurtenis welke met deze ontvanger werd waargenomen, was de occultatie van de Krabnevel door de maan, op 3 en op 30 november 1955. De grote spiegel in Dwingeloo was op dat moment nog niet geheel klaar en kon niet automatisch volgen. Daar de gebeurtenis zich in jaren niet op onze breedte zou herhalen, werd het

[15]) Ch. L. Seeger, 400 Mc/s partial eclipse observations on 30 June 1954, Bull. Astron. Inst. Netherlands (B.A.N.) no. 461, 3 dec. 1955, 273-283.
Ch. L. Seeger, G. Westerhout en H.C. van de Hulst, The flux densities of some radio sources at 400 Mc/s, B.A.N. no. 472, 26 nov. 1956, 89-99.
Ch. L. Seeger, A tentative measure of the flux density of Cassiopeia A at 400 Mc/s, B.A.N. no. 472, 26 nov. 1956, 100-104.
Ch. L. Seeger en G. Westerhout, Observations of occultations of the Crab Nebula by the moon at 400 Mc/s, B.A.N. no. 478, 9 sept. 1957, 312-316.
Ch. L. Seeger, G. Westerhout, T. Hoekema en R. G. Conway, verschijnt binnenkort in B.A.N.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

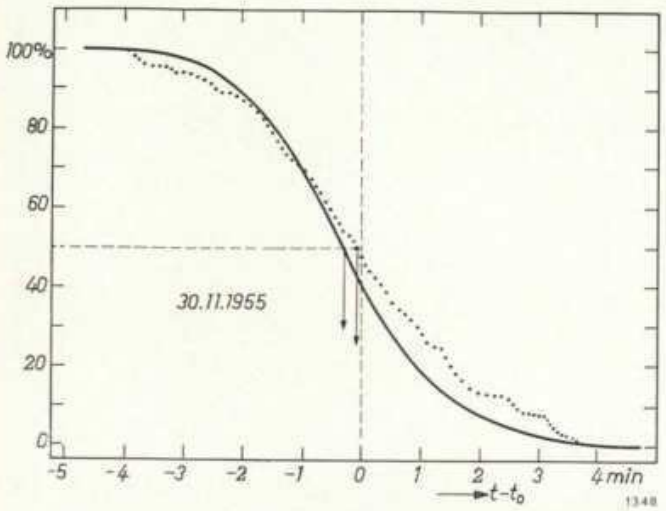


Fig. 15. Intensiteit van de 400-MHz-straling van de radiobron Taurus A (de Krabnevel, zie fig. 2), opgenomen te Dwingeloo tijdens het eerste deel van de occultatie door de maan op 30 november 1955 (stippels). De gemeten optische eclipskromme is eveneens weergegeven (getrokken lijn). t_0 is het berekende tijdstip waarop het midden van de, centraal in de nevel gelegen, dubbelster achter de maan verdween. De meting toonde aan dat het radiomiddelpunt van de Krabnevel slechts ca. 12 boogseconden afwijkt van het optische middelpunt (in groen licht).

constructiewerk vier dagen onderbroken om de waarnemingen te kunnen doen. De meting (*fig. 15*) toonde aan dat het radiomiddelpunt van de Krabnevel (Taurus A) vrijwel samenvalt met het optische middelpunt. In grote lijnen heeft de nevel op 400 MHz dezelfde omvang als optisch, maar de ruimtelijke verdeling van de radiostraling is veel vlakker dan de verdeling van (groen) licht. De meting van de eclips toonde tevens aan dat de maan geen detecteerbare breking van de radiogolven door een eventuele geioniseerde maanatmosfeer veroorzaakt. Dit werd op grond van eerdere berekeningen ook niet verwacht.

Grote gedeelten van de hemel werden voor de 400-MHz-straling in kaart gebracht. De antenne zwaaide telkens over 30° azimut, met een snelheid van ca. 10° in één minuut. De hoogte werd na elke zwaai 1° hoger gekozen. In *fig. 16* is een registreerstrook weergegeven, zoals bij een (in dit geval iets anders verlopende) zwaai van de antenne werd verkregen. De uit al deze, over enige maanden zich uitstrekkende, metingen geconstrueerde kaart is hier met een uitvoerig bijschrift gereproduceerd op blz. 328 en 329 als *fig. 17*. Dank zij de zeer grote gevoeligheid van de installatie (klein ruisgetal en groot straling vangend vermogen) en dank zij het grote scheidend vermogen van de 25-meter-spiegel, zijn de thans bereikte resultaten heel wat beter dan 10 jaar geleden mogelijk was. Men vergelijke de nieuwe kaart — die overigens nog lang niet alle door de metingen verkregen detailinformatie weergeeft (zie hieronder) — met de resultaten van Reber[16]) van 1948, *fig. 18*.

Op de kaart, fig. 17, zijn lijnen van constant ontvangen vermogen getekend (isofoten). Dit vermogen is, zoals reeds vermeld, een gewogen gemiddelde over de antennebundel; voorts stelt het een gemiddelde voor over de frequentieband van de ontvanger, doch binnen de bandbreedte van 10 MHz zijn de variaties voor de meeste bij 400 MHz waargenomen bronnen te verwaarlozen. Het richtingsdiagram van de antenne bevat behalve de hoofdbundel ook zijlobben (zie [1]) en [14])). Voor de invloed hiervan is een correctie mogelijk, die echter bij de hier gereproduceerde kaart niet is aangebracht. Evenals bij optische waarneming doet zich bij de

[16]) G. Reber, Cosmic static, Proc. Inst. Radio Engrs. **36**, 1215-1218, 1948.

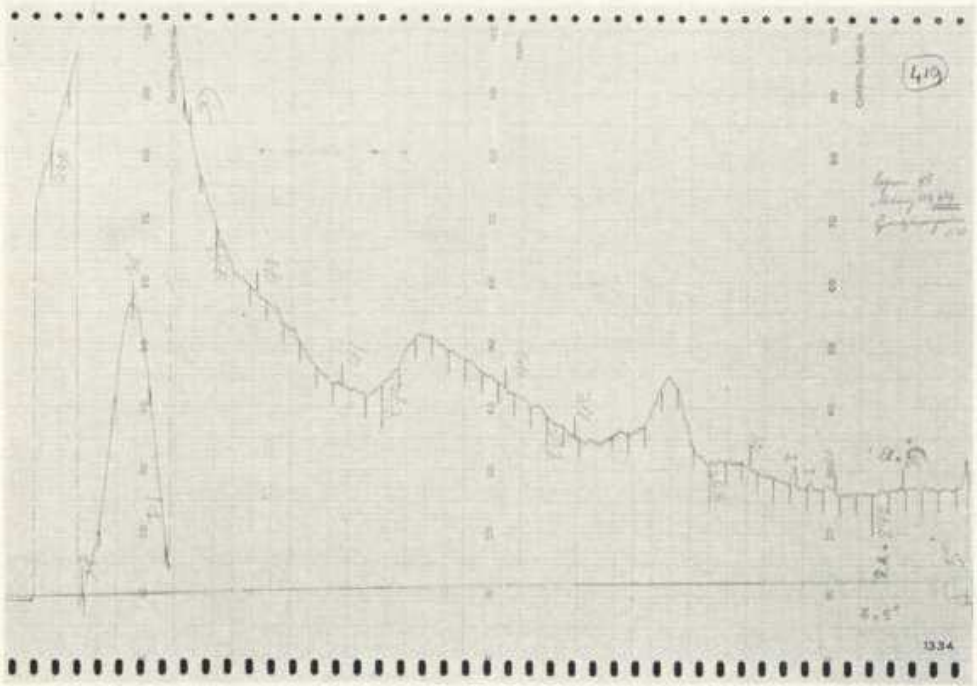


Fig. 16. Registreerstrook, zoals die met de beschreven ontvanger wordt verkregen bij één zwaai van de 25-m-spiegel te Dwingeloo. De weg van de antennebundel bij de hier weergegeven registratie is op het dekblad van fig. 17 gestippeld getekend. Bij de beweging werd in dit geval de declinatie constant gehouden, $\delta = 5°$, en de antenne bewoog met een snelheid van 8° in rechte klimming per minuut. Op de geregistreerde kromme ziet men graadmarkeringen, voor rechte klimming naar beneden, voor elevatie naar boven. Om de intensiteitstop bij het passeren van de Melkweg te kunnen registreren, is in dit gebied de schaal precies 100 schaaldelen verschoven.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info

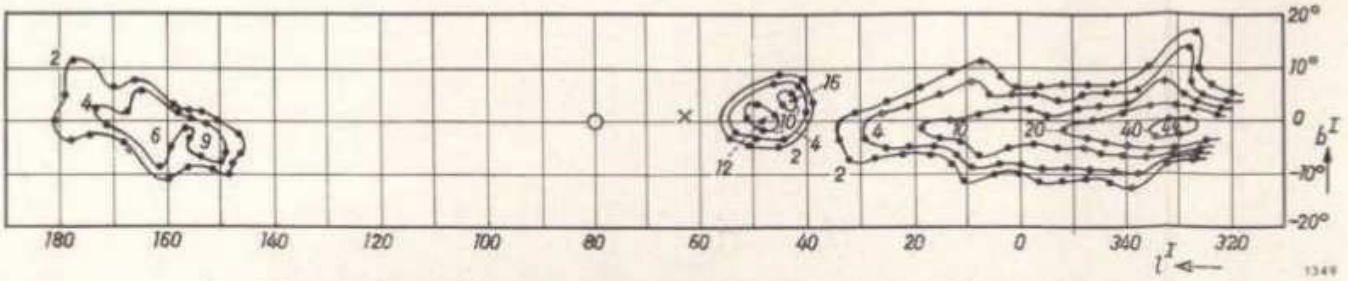


Fig. 18. Kaart van de hemel, in 480-MHz-straling gezien, volgens metingen van Reber [16]) in 1948. Weergegeven is het gedeelte van de hemel tussen dezelfde galaktische lengten l^I als in de nieuwe kaart, fig. 17. De vooruitgang in laatstgenoemde figuur, verkregen door het veel grotere scheidend vermogen en de grotere gevoeligheid waarmee de metingen te Dwingeloo zijn uitgevoerd, is wel zeer sprekend.

radiostraling door atmosferische invloeden een scintillatie voor, vooral als we meten in de richting van het noorden, waar aurora's optreden. Deze richting werd daarom zoveel mogelijk vermeden; naar het zuiden heeft men van scintillatie weinig last.

De getallen bij de isofoten zijn evenredig met het ontvangen vermogen; de eenheid is een fluxdichtheid van $9{,}1 \times 10^{-26}$ W/m²Hz, ofwel een antennetemperatuur van 1,3 °K. Om de kaart overzichtelijk te houden, zijn de isofoten met vrij grote intervallen getekend. De kaart geeft derhalve de grote structuur van de 400-MHz-straling uit het heelal duidelijk weer, maar vele kleine details, die uit de metingen af te leiden zijn, ontbreken hier en slechts de sterkste „puntbronnen" zijn duidelijk te onderkennen. In het bijschrift van de kaart worden een reeks bijzonderheden die hierop te zien zijn, toegelicht. Vooral de uitlopers van de algemene melkwegstraling, en de hiermee verbonden ogenschijnlijke antisymmetrie van de Melkweg ten opzichte van zijn „symmetrievlak", die door deze kaart voor het eerst is aangetoond, verdienen de aandacht.

Een steeds terugkerend probleem bij radioastronomische metingen is het optreden van radiostoringen, zowel door zenders en hun harmonischen (b.v. in ons geval radiosondes van Wales tot Kopenhagen, vliegtuigzenders van West-Engeland tot Zuid-Duitsland), als door secundaire oorzaken (b.v. de ontsteking van voertuigen tot op 5 of 10 km afstand). Zelfs in het vrij afgelegen Dwingeloo ging nog 25% van de nachtelijke waarnemingstijd door storingen verloren. (Overdag zijn geen metingen van zwakke bronnen in en buiten de Melkweg mogelijk, doordat de zon alles overstraalt.) Elders heeft men dezelfde moeilijkheden. Dit heeft gelukkig internationaal de aandacht getrokken. Op voorstel van Nederland heeft het C.C.I.R. (Comité Consultatif International des Radiocommunications), de technische adviesorganisatie van de samenwerkende P.T.T.'s der verschillende landen, een voorstel geaccepteerd om bepaalde frequenties voor de radioastronomie vrij te houden. Op de onlangs, op 21 december 1959, geëindigde vergadering van de I.T.U. (International Telecommunication Union), waarin de instanties die de frequenties toewijzen, bijeen waren, heeft men inderdaad bepaalde frequentiebanden uitsluitend voor de radioastronomie aangewezen, en andere frequentiebanden voor de radioastronomie samen met niet storende diensten, b.v. gerichte vliegveldinstallaties. Afgewacht moet nog worden of bij de uitvoering van dit toewijzingsbesluit de nodige internationale samenwerking zal worden gerealiseerd. Gezien de zeer algemene belangstelling voor de in de laatste tien jaar tot zo grote bloei gekomen wetenschap van de radioastronomie, mag men dit echter wel verwachten.

Samenvatting. Beschrijving van een eenvoudige, stabiele en gevoelige ontvanger voor het frequentiegebied 200 tot 500 MHz (150 tot 60 cm), die een zeer klein ruisgetal bezit ($F = 2{,}5$ bij 400 MHz), waardoor nauwkeurige meting van zeer zwakke radiostraling uit het heelal mogelijk is. De ontvanger werkt volgens het superheterodyneprincipe, met een middenfrequentie van 50 MHz. De hoogfrequentieversterker bevat twee schijftriodes EC 57 in cascodeschakeling, waarbij door een eenvoudige neutrodynisatie de effectieve katodeweerstand van de tweede buis zeer groot gemaakt is. Met deze schakeling verkrijgt men een grote versterking, terwijl de ruisbijdrage van de tweede buis vrijwel geëlimineerd is. Door een reeks maatregelen, o.a. gebruik van een detector van het zg. type met constante impedantie, frequentiestabilisatie van de lokale oscillator met een kwartskristal speciaal voor de metingen op 400 MHz, enz., is de ontvanger zo stabiel gemaakt dat zijn gevoeligheid weken achtereen niet merkbaar verloopt. Voor de ijking van de detector is in de middenfrequentieversterker een geijkte, in stappen van 1 dB instelbare, verzwakker aangebracht. Men kan de ontvanger een bandbreedte van 10 MHz of van 1 MHz geven, en de tijdconstante kan tussen 0,1 en 10 sec worden ingesteld.

Tot slot worden een aantal belangrijke radioastronomische waarnemingen beschreven die met deze ontvanger zijn verricht, vooral met gebruik van de 25-meter-paraboolspiegel van de radiosterrenwacht Dwingeloo — bij zijn ingebruikneming, in 1956, de grootste beweegbare spiegel ter wereld. De uit de metingen met deze spiegel geconstrueerde isofotenkaart van de hemel, die in het artikel is gereproduceerd, geeft de meest gedetailleerde informatie omtrent de structuur van de Melkweg, gezien in dit golflengtegebied, die thans beschikbaar is. Bijzonder opmerkelijk zijn een aantal uitlopers van de algemene melkwegstraling en een hiermee verbonden antisymmetrie van de Melkweg ten opzichte van zijn „symmetrievlak". Het absolute niveau van de gemeten stralingssterkten is bepaald door ijking met behulp van een hoornantenne; de radioster Cassiopeia A, het sterkste object aan de radiohemel op deze golflengten, blijkt een fluxdichtheid van 56×10^{-24} watt per m² per Hz te leveren.

Digitized in Heilo

www.freeservicemanuals.info

Fig. 17. Verdeling van de radiohelderheid van een deel van de hemel, gemeten op 400 MHz met de 25-m-spiegel te Dwingeloo. De getekende krommen zijn isofoten (lijnen van constant ontvangen vermogen). De getallen bij de krommen geven het vermogen, met als eenheid *) $9{,}1 \times 10^{-26}$ W/m²Hz ofwel 1,3 °K.

Het weergegeven gedeelte van de hemel omvat een stuk van de noordelijke Melkweg. Op het transparante dekblad zijn ter oriëntatie de bekendste optische objecten in dit gebied van de hemel getekend; de Melkweg zelf is hierop in grijze tint aangegeven, zijn symmetrievlak loopt door de ongeveer horizontale punt-streep-lijn. De graadverdeling geeft horizontaal de galaktische lengte (l^{I}), vertikaal de galaktische breedte (b^{I}). In de richting van het cirkeltje *C* ligt, van ons uit gezien, het centrum, in de richting van *A* het anticentrum van de Melkweg. De sterren in onze nabijheid bewegen bij hun algemene wenteling om het centrum van de Melkweg in richting *B* ($l^{\text{I}} = 57°$). Een groot deel van de Melkweg komt voor Dwingeloo nooit boven de horizon. Deze begrenzing van het voor de metingen toegankelijke gebied van de hemel geeft de lijn aan de rechterzijde aan. De getekende „praktische" horizon ligt, omdat de metingen zeer dicht bij de horizon erg onnauwkeurig worden, nog iets hoger dan de theoretische. De gestippelde lijn $\delta = 5°$ (Meas. Nr. 419) geeft de weg van de antennebundel aan waarbij het in fig. 16 gereproduceerde registrogram verkregen werd.

Gewezen wordt op de volgende bijzonderheden die uit de radiokaart af te leiden zijn.

1) De radiostraling is sterk geconcentreerd rond het (symmetrie)vlak van de Melkweg. Verder neemt de straling in dit vlak zeer sterk toe als men de richting naar het centrum nadert.

2) De sterkste puntbronnen, of gebieden met plaatselijk hoge intensiteit, hopen zich eveneens nabij het vlak van de Melkweg op. Van de meeste bronnen die men op de kaart ziet, weet men dat het grote gebieden van heet geïoniseerd gas betreft die heldere sterren omgeven. Dit zijn de uit de klassieke astronomie welbekende zg. H II-gebieden (geïoniseerde waterstof). Behalve de hieronder besproken uitzonderingen, zijn alle geïdentificeerde radiobronnen (rood ingedrukte benamingen) van dit type. Van geen dezer bronnen kon de ware afmeting worden bepaald: ze beslaan een veel kleinere hoek dan de antennebundel waarmee de kaart is opgenomen. De duidelijk als zodanig te onderscheiden puntbronnen bevinden zich voor het merendeel betrekkelijk dicht bij ons (op afstanden van minder dan 4000 lichtjaren). In verhouding zijn de meeste ervan niet zeer sterke stralers, maar ze lijken relatief sterk door hun nabijheid. Van sommige van deze H II-bronnen heeft men kunnen vaststellen dat ze meervoudig of samengesteld zijn, hetzij door radio-onderzoek met nog groter scheidend vermogen (G. Westerhout, B.A.N. no. 488 van 31 dec. 1958) of door optisch onderzoek. Cygnus X b.v. bestaat uit een dozijn of nog meer afzonderlijke, hoewel nauw bij elkaar gelegen, H II-gebieden.

3) Vier van de radiobronnen waarvan de identiteit is aangegeven, wijken door hun geheel verschillend karakter duidelijk af van de zojuist besproken soort. In tegenstelling met de H II-bronnen zijn deze vier bij lange golven helderder dan bij korte.

Cassiopeia A: Behalve bij korte golven, waar de zon het wint, is deze bron in het gehele radiospectrum het sterkste object aan de hemel. Na zorgvuldige lokalisatie met behulp van radiometingen door F. G. Smith hebben Baade en Minkowski deze bron met de 5-meter-spiegeltelescoop van Mount Palomar onderzocht. Het bleek een min of meer bolvormige schil te zijn, bestaande uit enigszins cirrusachtige gaswolken, die snel aan het expanderen is, met radiale snelheden van verscheidene duizenden kilometers per seconde. De bron ligt op ongeveer 10^4 lichtjaren afstand in een van de buitenste spiraalarmen van de Melkweg. Aangenomen wordt dat men hier met de overblijfselen van een geëxplodeerde ster (een supernova) te maken heeft. Overigens geeft de isofoot 300 van deze bron een heel nauwkeurig beeld van de dwarsdoorsnede op halve topintensiteit van de antennebundel. Van deze radiobron weet men nl. dat ze een diameter van slechts $^1/_{12}$ graad heeft en dat ze zeer veel sterker is dan enige andere bron in de onmiddellijke nabijheid.

Cygnus A: Hoewel dit object aan de radiohemel schijnbaar in helderheid op de tweede plaats komt, is het in werkelijkheid de sterkste radiobron die we kennen. Ook dit object is door het werk van Smith, Baade en Minkowski met zekerheid geïdentificeerd kunnen worden: het bestaat uit twee botsende melkwegstelsels op een afstand van 10^9 lichtjaren. Waren ze iets verder weg, dan zouden ze met de tegenwoordige optische middelen niet meer waarneembaar zijn, hoewel de radiotelescoop ze nog gemakkelijk zou „zien".

Taurus A: De befaamde, in dit artikel herhaaldelijk genoemde Krabnevel (fig. 2), de restanten van een reusachtige sterexplosie (supernova), op een afstand van ca. 4000 lichtjaren. Er is reeds op gewezen dat men hier met zg. synchrotronstraling te maken heeft.

IC 443: Ook dit is een uit gas bestaand cirrusachtig object. De identificatie met de radiobron schijnt wel vast te staan, maar de wijze van ontstaan van de straling is nog onduidelijk.

4) Binnen ongeveer 60 lengtegraden van het Melkwegcentrum neemt het niveau van de totale radiostraling naar het centrum toe tot een, vrij vlak, maximum, zoals onder (1) reeds is gesignaleerd. Uit metingen bij hoge en bij lage frequenties weet men dat op zijn minst twee verschillende mechanismen tot deze straling bijdragen. Een aanzienlijk deel van de hier waargenomen 400-MHz-straling kan worden toegeschreven aan H II-gebieden die in de kijkrichting over ons gehele Melkwegstelsel verspreid zijn, maar het grootste gedeelte behoort tot een achtergrond die een geheel andere oorsprong moet hebben. Het spectrum van dit tweede soort straling vertoont een intensiteit die met de golflengte toeneemt, ongeveer zoals de straling van de bronnen die onder (3) zijn genoemd. Het ontstaan van deze, niet-thermische, straling is tot dusver onverklaard, hoewel er een aantal redenen zijn om aan te nemen dat ze in verband gebracht moet worden met een algemeen magnetisch veld van de Melkweg en met deeltjes van zeer grote snelheid, zoals ze in de kosmische straling voorkomen. Dit is de stralingscomponent die door Jansky, de pionier van de radioastronomie, omtrent 1930 werd ontdekt en die bij de latere onderzoekingen karakteristiek bleek voor alle melkwegstelsels die van hetzelfde type zijn als het onze. Midden in het gebied waar deze niet-thermische straling vandaan komt, zien we nog een sterke H II-bron, Sagittarius A. Deze bron ligt zeer dicht bij het rotatiecentrum van de Melkweg.

5) Van de grote melkwegstelsels buiten het onze is M31, de Andromedanevel, het meest naburige. Zijn ligging is op het dekblad aangegeven. Hoewel dit object in onze registrogrammen goed te onderscheiden is, komt het op de kaart nauwelijks te voorschijn, ten gevolge van de grote stappen waarin we de isofoten hebben getekend, te meer daar zich in hetzelfde hemelgebied een kleine arm van de stralende materie blijkt te bevinden die tot onze eigen Melkweg behoort.

6) Een opvallend verschijnsel op alle radiokaarten die sinds het vroege werk van Reber op diverse golflengten vervaardigd zijn, is de uitloper, die door de gestippelde vertikale lijn *D* is aangegeven. Onze kaart vertoont hierin méér structuurdetails dan alle vroegere karteringen, dank zij het grotere scheidend vermogen en de grotere gevoeligheid, en misschien ook ten gevolge van een verschillende helderheidsverdeling bij andere golflengten.

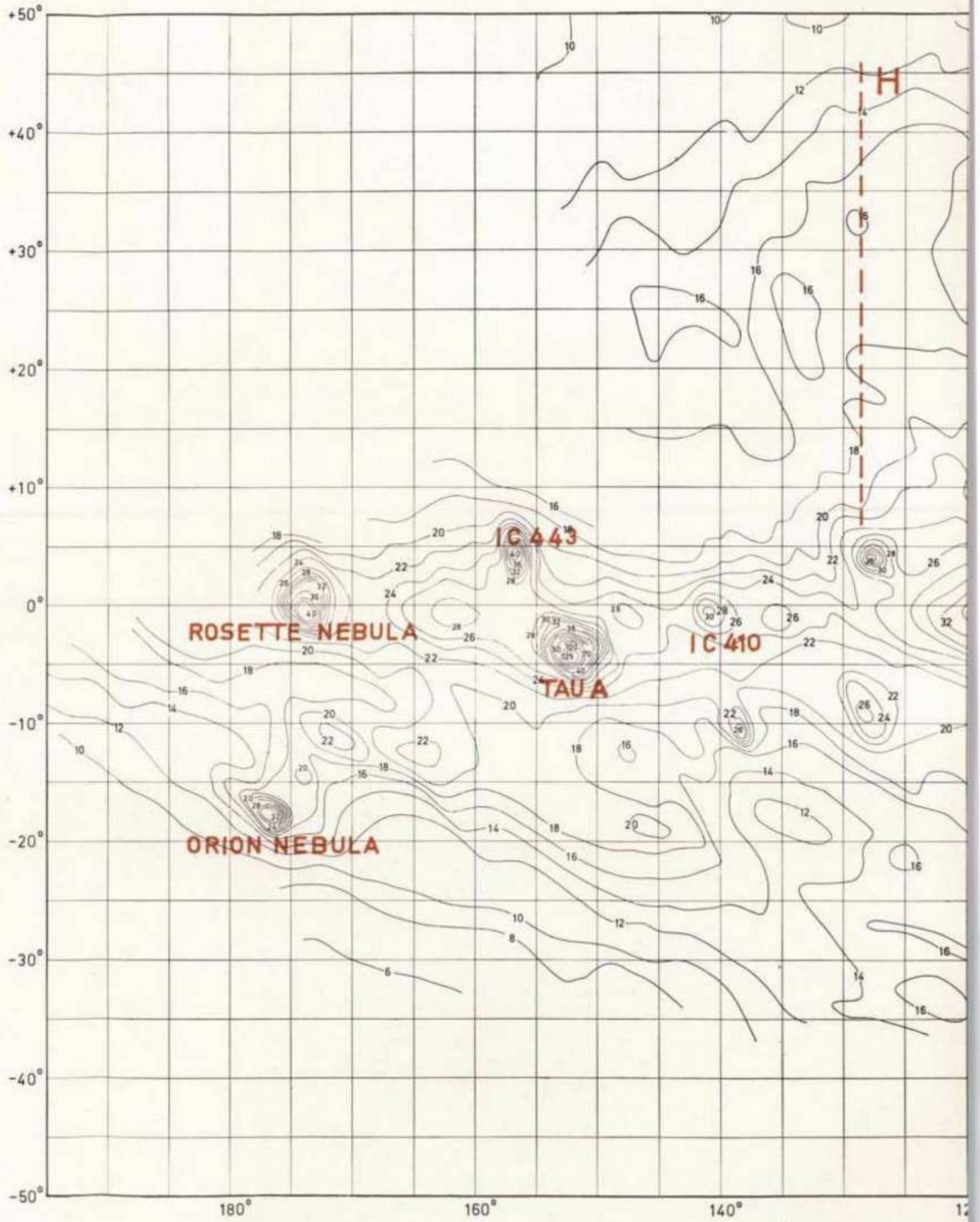
Deze radio-uitloper vindt in het optische beeld van de Melkweg geen tegenhanger en zijn oorsprong is geheel onbekend. Het is zelfs niet met zekerheid te zeggen of men hier met een plaatselijke uitstulping te maken heeft dan wel met een bijzonderheid van de vorm van de gehele Melkweg. Op de kaart is nog een ander verschijnsel te zien, dat bij deze kartering voor het eerst werd opgemerkt: als een soort echo's van de genoemde uitloper treden nog twee soortgelijke maar zwakkere uitlopers op, in de richtingen die door de gestippelde lijnen *F* en *H* zijn aangegeven.

Over het geheel genomen kan men zeggen dat ons Melkwegstelsel een hoge graad van symmetrie bezit, zowel optisch als op radiogolven: het is rotatiesymmetrisch en bovendien vertoont het spiegelsymmetrie ten opzichte van het Melkwegvlak. De beschreven uitlopers echter vormen een opvallende uitzondering op deze regel: hier treedt aan slechts één zijde van het Melkwegvlak tot hoge galaktische breedte een, relatief zwakke, radiostraling op. Voorts schijnen de noordelijke uitlopers *D* en *F* vergezeld te gaan van twee bij ongeveer dezelfde galaktische lengten optredende minima, *E* en *G*, op zuidelijke galaktische breedten. Deze in sterke mate anti-symmetrische verdeling van de straling is een eigenschap van de radio-Melkweg die tot de voltooiing van deze kartering min of meer onopgemerkt is gebleven. Vergelijkbare karteringen die men bij veel langere golven heeft verricht, tonen het effect op geen stukken na zo duidelijk. Of het ook bij veel kortere golven optreedt, is niet bekend, ten gevolge van de thans nog onvoldoende gevoeligheid der radiotelescopen.

*) Deze waarde (de evenredigheidscoëfficiënt in het door ijking gevonden verband tussen uitgangsspanning en ingangsvermogen van de ontvanginstallatie) heeft een geschatte onzekerheid van $\pm$ 15%. Zie hiervoor het derde in [15]) aangehaalde artikel. Bovendien heeft het nulpunt van de schaal een geschatte onzekerheid van 10 tot 15 °K.

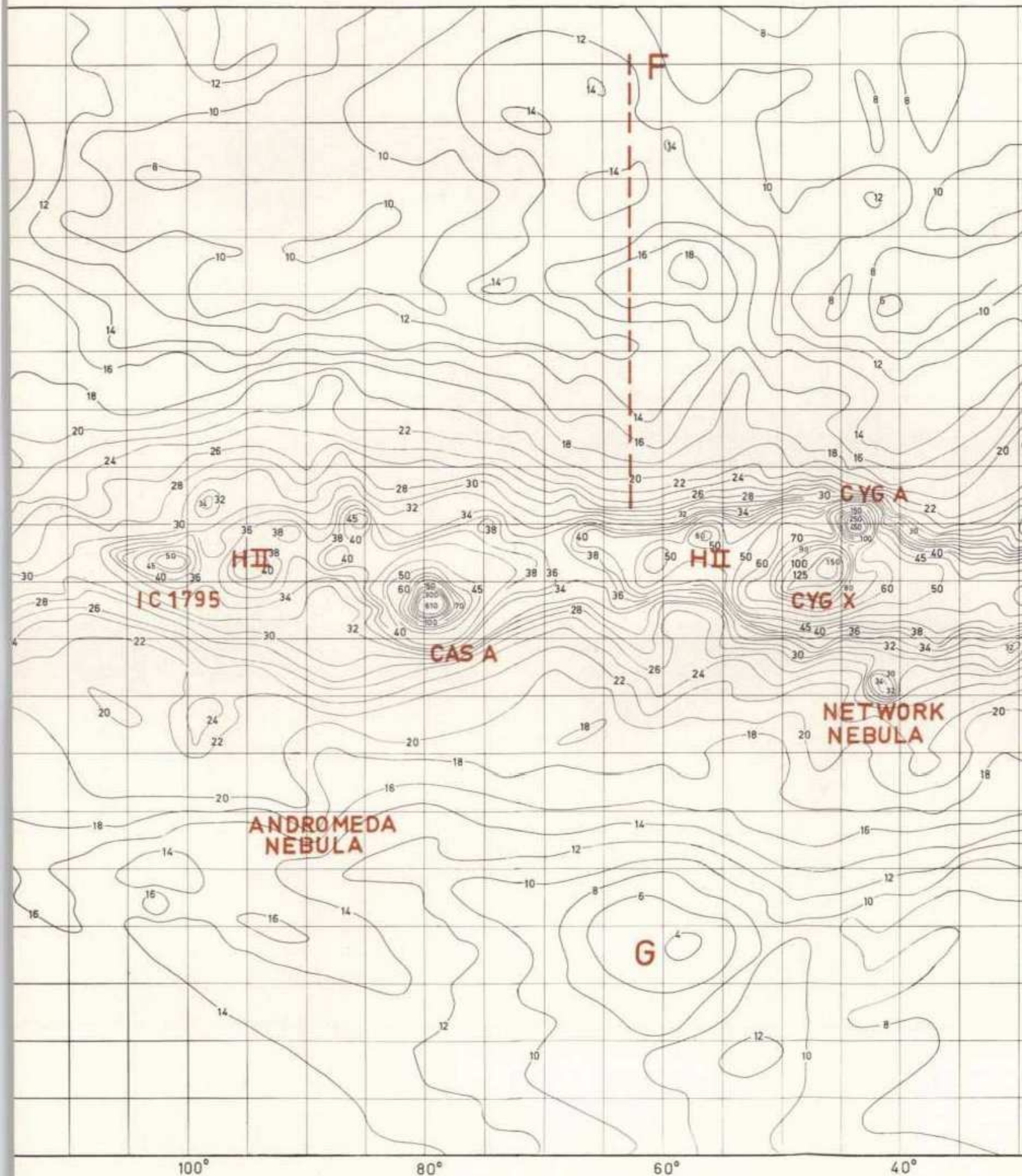
Digitized in Heiloo the N

11/14/2023



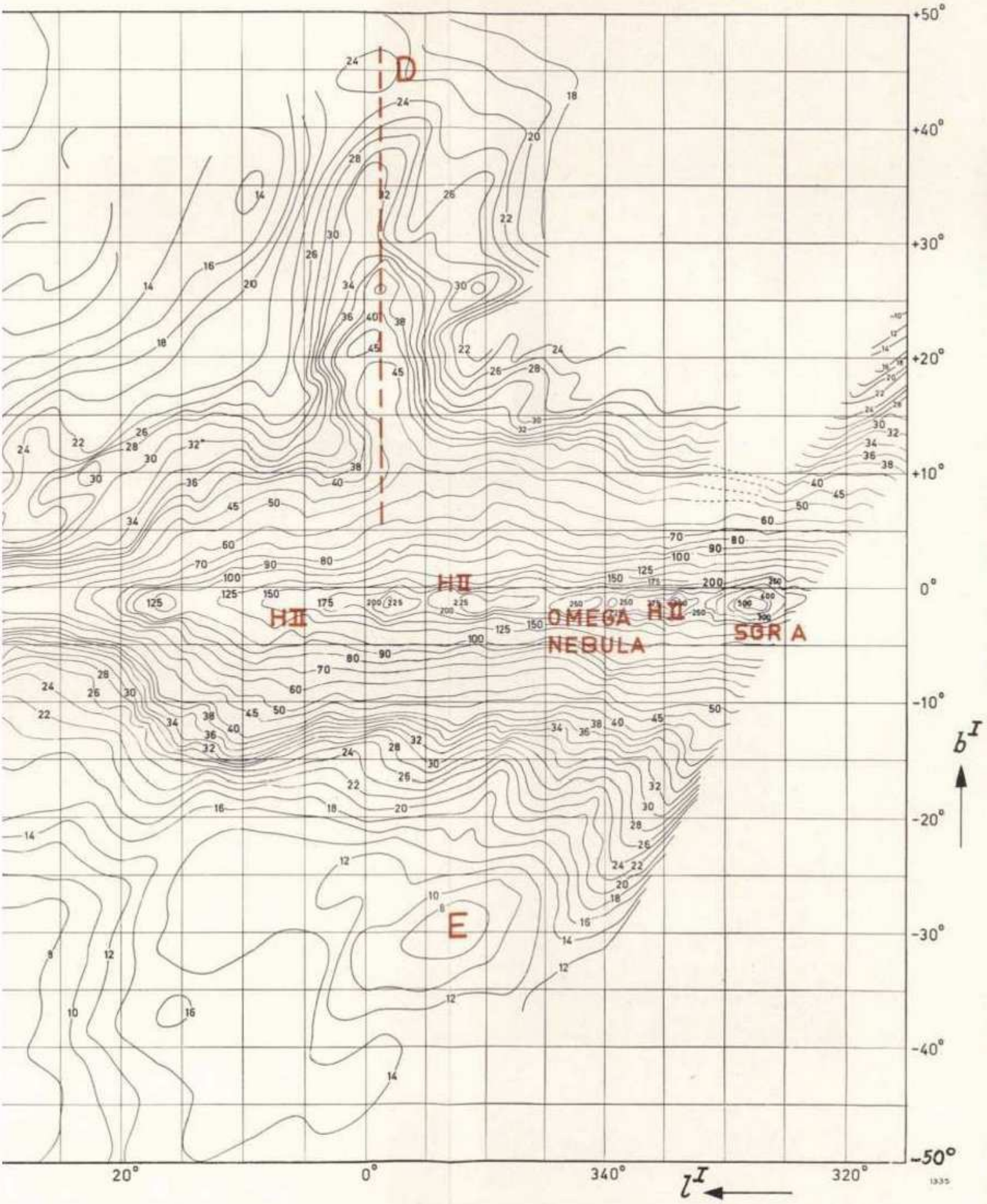
Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info



Digitized in Heiloo

11/14/2023



the Netherlands

Not for sale!

11/14/2023

DE VRUCHTEN EN DE WORTELS VAN HET ONDERZOEK VAN DE VASTE STOF

door D. POLDER.

539.2:54-16

Het onderstaande artikel is in hoofdzaak gelijkluidend met de rede, door Prof. D. Polder uitgesproken op 2 dec. 1959 bij de aanvaarding van het ambt van buitengewoon hoogleraar aan de Technische Hogeschool te Delft. Aan de hand van enkele voorbeelden laat de spreker de betekenis van vaste stoffen voor toepassingen in de elektronentechniek zien. Vervolgens beschouwt hij de opbouw van de theorie, welke de basis vormt van iedere discussie van de verschijnselen die zich op het gebied van de vaste stof voordoen.

De rede is hier, met vriendelijke medewerking van Prof. Polder, aangevuld met een zeer beknopte bibliografie.

„Germanium, atoomnummer 32, atoomgewicht 72,6, smeltpunt 958 °C, s.g. 5,35, was al voorspeld door Mendelejef als eka-silicium, voordat het in 1886 door Winkler werd ontdekt". Dit is de eerste zin van het artikel over germanium in de zesde druk van de Winkler-Prins Encyclopedie, uitgegeven in 1950. De laatste zin van het artikel moge hier eveneens worden aangehaald. Hij luidt: „Praktische betekenis heeft het element in het geheel niet". Rekening houdende met de vertraging die de uitgave van de Winkler-Prins door de tweede wereldoorlog heeft ondervonden, mogen wij aannemen dat deze zin ongeveer de stand van zaken weergeeft van ruim 15 jaar geleden. Thans, in 1959, worden van het element germanium jaarlijks meer dan honderd miljoen transistors gemaakt in fabrieken in vele landen van de wereld. Germanium, dat in de leerboeken van de chemie jarenlang slechts terloops ter sprake kwam en waarvan de fysische eigenschappen slechts oppervlakkig bestudeerd waren, kan thans, uit chemisch, technologisch en fysisch oogpunt, met recht één van de best onderzochte van de vaste stoffen genoemd worden.

Germanium is een halfgeleider. Vóór 1940 waren de verschijnselen die in halfgeleiders optraden nog in vele opzichten raadselachtig. Het elektrisch geleidingsvermogen van deze stoffen was veel kleiner dan dat van de metalen, maar toch ook weer te groot om de stoffen als isolatoren te kunnen aanzien. Men vond dat het geleidingsvermogen soms vrijwel onafhankelijk was van de temperatuur, maar in andere gevallen zeer sterk met de temperatuur toenam, een verschijnsel dat bij de metalen onbekend was [1]). Afwijkingen van de wet van Ohm traden vaak reeds bij zeer kleine stroomdichtheid op. Het ergste was dat het gedrag van de halfgeleiders zo gevoelig bleek te zijn voor verontreinigingen in deze, op zichzelf toch al wat vreemde, chemische stoffen. Menig rechtgeaard fysicus was daarom geneigd de verschijnselen in halfgeleiders met een groot wantrouwen te beschouwen.

De ongewone geleidingseigenschappen van halfgeleiders trokken intussen de aandacht van diegenen die op zoek waren naar vreemde, maar praktisch toepasbare, eigenschappen van de materie. De negatieve temperatuurcoëfficiënt van de weerstand van oxydische halfgeleiders kon handig gebruikt worden om de gloeistroom bij het inschakelen van een radiobuis onder de duim te houden [2]). De niet-lineaire elektrische karakteristiek, die bij halfgeleiders kan optreden, bleek, in een zogenaamde puntcontactdiode, een machtig hulpmiddel te zijn bij de detectie van signalen in de radartechniek [3]). Gedurende de oorlog werd in dit verband germanium als halfgeleider voor het eerst systematisch bestudeerd. Het was door de vraag naar praktische toepassingen, dat ook de fundamentele halfgeleiderfysica de aandacht kreeg die menig fysicus haar niet waard geacht had.

Het grote ogenblik in de geschiedenis van de halfgeleider germanium kwam met de ontdekking van de transistorwerking, die in 1948 in de Bell Laboratoria door Shockley, Bardeen en Brattain aan dit element gedaan werd [4]). De ontdekking leidde tot de mogelijkheid een stukje germanium de taak van een radiobuis te laten vervullen. Als versterker van elektrische signalen steekt thans de germaniumtransistor de radiobuis naar de kroon. De transistorwerking zelf is een bijzonder verrassend fysisch verschijnsel. Het is bovendien een zeer goed begrepen verschijnsel, dat in genen dele gebonden is aan de specifieke chemische eigenschappen van het element germanium. Het kan in principe ook optreden in andere elementaire halfgeleiders en in halfgeleidende verbindingen.

De uitvinding van de transistor is van grote betekenis geweest voor de recente ontwikkeling van de fysica van de vaste stof. De intensieve studie van alle mogelijke halfgeleiders die op dit ogenblik in zeer vele laboratoria plaatsvindt [5]), is er een direct gevolg van. Ruimer gezien, heeft het bestaan van de transistor en de daaraan verwante vaste-stof-„devices" op zeer nadrukkelijke wijze de aandacht ge-

o the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

vestigd op de grote en gevarieerde technische mogelijkheden die er schuilen in de eigenschappen van vaste stoffen, en in het bijzonder in de eigenschappen die samenhangen met het gedrag van de elektronen in de vaste materie. Het zou evenwel onjuist zijn te menen dat vóór de uitvinding van de transistor de technische mogelijkheden van de vaste stoffen in de elektronentechniek nog nauwelijks opgemerkt waren. Het uitgebreide werk aan de oxydische halfgeleiders en de magnetische materialen, dat onder meer in ons land gedaan werd en nog steeds gedaan wordt [6]), getuigt van het tegendeel. De toepassingen van de magnetische materialen strekken zich uit over het gehele door de elektronentechniek bestreken frequentiegebied van de elektromagnetische golven. Het onderzoek van het magnetisme, ook het zuiver wetenschappelijke onderzoek, is in sterke mate beïnvloed door de vraag naar technische toepassingen. De transistor heeft er evenwel niets mee te maken gehad.

In een ruimer verband dan dat van het vaste-stof-onderzoek is de transistor aangevoerd als een frappant bewijs van de juistheid van de stelling, dat hij die praktisch toepasbare verschijnselen zoekt, zich moet wijden aan het zuiver wetenschappelijk onderzoek. De eerste zin van de inleiding tot Shockley's befaamde boek over de transistorfysica [7]) luidt: „If there be any lingering doubts as to the wisdom of doing deeply fundamental research in an industrial laboratory, this book should dissipate them". Het is niet moeilijk een aantal aspecten aan de uitvinding van de transistor op te noemen die de stelling ondersteunen. Men kan stellen dat de in het element germanium gevonden transistorwerking een onverwacht en bijzonder verrassend effect was, dat alleen als zodanig herkend werd omdat het gevonden werd in het raam van een systematisch en logisch opgebouwd fundamenteel onderzoek. Men kan aanvoeren dat de uitbuiting van het effect tot een technisch bruikbare toepassing alleen mogelijk is geweest door het volledig en fundamenteel begrijpen van het fysische verschijnsel. Het is moeilijker om aan te geven *hoe* fundamenteel het onderzoek in een industrieel laboratorium zou moeten zijn [8]). Er is een andere zinsnede uit de genoemde inleiding tot Shockley's boek, die in dit verband niet over het hoofd gezien mag worden: „But there should be no illusion about the necessity of a large measure of good luck".

Hoe men ook over de verhouding van de wetenschap tot de industrie moge denken, het valt niet te ontkennen dat na de ontdekking van de transistor het onderzoek van de vaste stof zich enorm heeft uitgebreid en dat veel van het zuiver wetenschappelijk werk thans wordt verricht in de grote industriële laboratoria. De belangstelling voor vaste stoffen, die bij grote en kleine industriële ondernemingen en bij sommige regeringsinstanties aanwezig is, blijkt onder meer uit de vele advertenties in de Amerikaanse bladen, waarin het onderzoek van de vaste materie de fysicus wordt aangeprezen als een van de mogelijkheden om in de industrie een aantrekkelijke loopbaan te beginnen. Deze advertenties zijn vanuit een ander gezichtspunt ook wel interessant. Zij geven een vrij betrouwbare indicatie omtrent de onderwerpen die op het ogenblik actueel zijn: infrarooddetectoren, vaste-stof-microgolfversterkers, thermoelektrische koeling, geheugenelementen, hoogfrequentiediodes, theorie van „devices", fotogeleiders, halfgeleidertechnologie, dunne magnetische lagen. Dit zijn slechts een paar onderwerpen die speciaal in de elektronische industrie de aandacht vragen.

Aan de hand van de lotgevallen van een enkel chemisch element, het germanium, heb ik getracht een indruk te geven van de stormachtige ontwikkeling die zich op het gehele gebied van de vaste stof voordoet. Het gekozen voorbeeld gaf mij de gelegenheid de nadruk te leggen op de grote stimulans die het onderzoek heeft ondervonden van de vraag naar technische toepassingen. Gelukkig zijn er vele gebieden in de fysica van de vaste stof die gegroeid zijn zonder deze stimulans. Als ik zeg gelukkig, is dat niet omdat ik het bestaan van de prikkel van de toepasbaarheid betreur of haar minderwaardig acht, maar omdat ik het gelukkig vind dat voor wetenschappelijke nieuwsgierigheid deze stimulans geen noodzakelijke voorwaarde is. Als voorbeeld zal ik kort een onderwerp bespreken dat in hoofdzaak aan de universiteiten is bestudeerd.

Gebruik makende van de mogelijkheden die de ontwikkeling van de radartechniek gedurende de laatste wereldoorlog heeft geschapen, is na de oorlog in het Clarendon laboratorium van de universiteit van Oxford het onderzoek ter hand genomen van de absorptie van microgolven in paramagnetische zouten [9]). Door het theoretische werk van Van Vleck, door susceptibiliteitsmetingen en metingen van de soortelijke warmte bij lage temperaturen wist men reeds vele jaren dat paramagnetische ionen in kristallen energieniveaus kunnen hebben die, wat betreft hun energiewaarden, zeer dicht bij elkaar liggen [10]). Indien men langs spectroscopische weg de onderlinge ligging van de niveaus direct wil bepalen, heeft men daarvoor elektromagnetische golven met een golflengte van ongeveer 1 cm nodig. De microgolfabsorptie, ook wel elektronenspinresonantie genoemd, was daarom destijds in de eerste plaats microgolfspectroscopie. Thans heeft het on-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

derzoek met microgolven, dat in Oxford en in vele andere plaatsen wordt uitgevoerd, een veel ruimer aspect. Eén van de meest actuele punten van onderzoek is dat van het relaxatiemechanisme. Het is de vraag naar de snelheid en de oorsprong van de processen die het thermisch evenwicht tussen de verschillende energieniveaus trachten te bewerkstelligen. Een ander actueel onderwerp is het gebruik van de techniek van de elektronenspinresonantie en de daaraan verwante kernspinresonantie voor het onderzoek van de structuur van de vaste stof [11]). Speciaal bij de studie van de structuur van verontreinigingen en andere roosterfouten is de resonantietechniek een machtig hulpmiddel. Het is een voorbeeld van een academische toepassing van een academisch onderzoek.

Het is interessant op te merken dat het resonantie-onderzoek behalve tot de zojuist genoemde academische toepassing ook tot een aantal technische toepassingen heeft geleid. Zo wordt de kernspinresonantie gebruikt voor chemische analyse van mengsels van organische verbindingen, b.v. in de vetverwerkende industrie. Een tweede toepassing, die ik wat uitvoeriger wil bespreken, berust op een uitvinding die door Bloembergen van Harvard University is gedaan. Uit het werk van Townes over de microgolfabsorptie van gasmoleculen was bekend dat, onder bepaalde omstandigheden, moleculen in een microgolfveld in plaats van absorptie emissie kunnen geven [12]). Het is het bekende verschijnsel van de gestimuleerde emissie. Aangezien de gestimuleerde emissie coherent is met de opvallende elektromagnetische golf, kan het verschijnsel gebruikt worden om het opvallende signaal te versterken. In de Microwave Amplifier by Stimulated Emission of Radiation, de zogenaamde MASER, werd het fundamentele verschijnsel van de gestimuleerde emissie voor het eerst in zuivere vorm toegepast. Een noodzakelijke voorwaarde voor het optreden van een netto emissie is, dat van de twee energieniveaus in het molecuul, die bij de emissie betrokken zijn, het bovenste gemiddeld meer bezet is dan het onderste. In thermisch evenwicht is dit niet het geval. Het is dan ook noodzakelijk op slimme wijze de gewenste, zogenaamde omgekeerde, bezetting te bewerkstelligen. Bloembergen vroeg zich nu af, of het mogelijk zou zijn het denkbeeld van de maser ook in een paramagnetisch zout te realiseren [13]). Uit het werk over de microgolfspectroscopie was over energieniveaus met de goede orde van grootte van energieverschillen zeer veel bekend. De studie van de paramagnetische relaxatie bij de temperatuur van vloeibaar helium verschafte het inzicht dat het mogelijk moest zijn ook hier — en volgens een met de microgolftechniek betrekkelijk eenvoudig uitvoerbare methode — de gewenste bezetting tot stand te brengen. Inderdaad is het, na het bekend worden van de denkbeelden van Bloembergen over de vaste-stofmaser, op verscheidene plaatsen gelukt deze nieuwe microgolfversterker te maken. De bijzondere belangstelling die er van technische zijde voor de maser bestaat, ondanks de bezwaren verbonden aan het werken met vloeibaar helium, wordt verklaard uit het feit dat masers versterkers zijn met een in principe zeer geringe eigen ruis. Voor het versterken van zeer zwakke signalen uit de wereldruimte is deze omstandigheid van grote betekenis.

In het voorgaande zijn wij twee versterkers tegengekomen die beide de eigenschappen van een vaste stof uitbuiten, namelijk de transistor en de maser. Dit moge een aanleiding zijn om de principes waarop de versterking in deze en andere gevallen berust, met elkaar te vergelijken. Bij de transistor heeft men, evenals bij de radiobuis, te maken met een, in eerste instantie, constant vloeiende stroom, die door een wisselstroomsignaal periodiek wordt gevarieerd op zodanige wijze dat het signaal daarbij vrijwel geen arbeid verricht. De energie die door het versterkte signaal wordt geleverd, vindt zijn oorsprong in de bron die de constant vloeiende stroom levert. Nu is het wèl zo dat het mechanisme waardoor de stroom in de radiobuis vloeit, verschillend is van het mechanisme dat de stroom in de transistor onderhoudt. Bij de buis is er een stroom door een elektrisch veld, en bij de transistor loopt de stroom ten gevolge van een concentratiegradiënt van ladingdragers, geïnjecteerd in een laagje halfgeleider. Dit neemt niet weg dat de transistor en de radiobuis, als vierpool beschouwd, veel met elkaar gemeen hebben.

De maser daarentegen is een echte negatieve-weerstandversterker. Preciezer gezegd, het paramagnetische zout gedraagt zich in de maser ten opzichte van het signaal als een afgestemde kring, bestaande uit een negatieve weerstand, een negatieve zelfinductie en een negatieve capaciteit. Op zichzelf heeft deze combinatie dezelfde eigenschappen als een kring met louter positieve elementen, doch zodra zij belast wordt met een positieve weerstand, kan men haar gebruiken als generator of versterker van elektromagnetische trillingen. Natuurlijk krijgt men ook hier niets voor niets. Wil men bij een negatieve-weerstandversterker de energiebron opsporen, dan moet men ingaan op de wijze waarop de negatieve weerstand fysisch tot stand komt. Bij de maser ziet men dadelijk dat de energie geleverd wordt door de gestimuleerde overgangen van het molecuul of paramagnetisch ion van een hoger naar

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

een lager energieniveau. Door het slimme mechanisme waarmee de omgekeerde bezetting desondanks in stand gehouden wordt, brengt men de voor de versterking nodige energie voortdurend het systeem binnen.

Het grote verschil tussen versterkers van het soort van de radiobuis en die van het negatieve-weerstandtype is, dat bij de eerste soort veranderingen in het uitgangscircuit het ingangssignaal nauwelijks beïnvloeden, terwijl dit bij het tweede type juist wel het geval is. Aangezien de afwezigheid van terugwerking voor de praktijk van groot belang is, wenst men de negatieve-weerstandversterker te completeren met zogenaamde richtingsisolatoren. Dit zijn netwerkelementen die signalen die van de ene kant komen wèl, en signalen die van de andere kant komen níet doorlaten. Vaste stoffen in thermodynamisch evenwicht kunnen onder bepaalde omstandigheden de niet-reciproke eigenschappen vertonen die voor het construeren van een richtingsisolator vereist zijn [14]). Het klassieke voorbeeld hiervan is de microgolfrichtingsisolator, die door Hogan werd bedacht en die het bestaan van de niet-symmetrische permeabiliteitstensor in voorgemagnetiseerde ferrieten nuttig gebruikt [15]). Op een analoge wijze kan de niet-symmetrische weerstandstensor van een halfgeleider die zich in een magneetveld bevindt, gebruikt worden [16]).

In dit verband kan opgemerkt worden dat in de laatste jaren het versterken met een door de vaste stof geleverde negatieve weerstand bijzonder in de belangstelling staat. Men hoopt onder meer dat hier nog nieuwe mogelijkheden liggen voor het versterken van signalen van buitengewoon hoge frequenties. Een zeer recent voorbeeld is de door Esaki in Japan uitgevonden tunneldiode [17]). Een tunneldiode is een halfgeleider, zó geconstrueerd dat daarin ergens over een laagje van niet meer dan 100 Å dik de stroom slechts lopen kan door het quantummechanische tunneleffect; een laagje dus waar de elektronen kruipen waar ze niet gaan kunnen. Het afknijpen van de tunnelstroom door de verhoging van de aangelegde spanning geeft aanleiding tot een negatieve differentiaalweerstand. Een ander voorbeeld is de zogenaamde parametrische versterker [18]). Evenals de maser gedraagt een parametrische versterker zich ten opzichte van het te versterken signaal als een kring met louter negatieve elementen. In tegenstelling met de maser of met de tunneldiode komt de formele negatieve weerstand bij een parametrische versterker niet tot stand door de fysica van een weerstandelement. Bij de parametrische versterker is het essentieel dat er een capaciteit, een zelfinductie of een ander reactief element aanwezig is waarvan de waarde varieert met de aangelegde spanning of de toegevoerde stroom. De voor de versterking nodige energie wordt geleverd door een wisselstroombron met een frequentie die verschilt van, en gewoonlijk hoger is dan, de frequentie van het te versterken signaal. De werking van dit type versterker kan men met een eenvoudig sommetje demonstreren. Maar blijkbaar ligt dit sommetje niet zo erg voor de hand, getuige het feit dat de parametrische of reactantieversterker herhaalde malen in deze eeuw is ontdekt en weer vergeten. Het is gedurende de laatste jaren gebleken dat met behulp van vaste stoffen parametrische versterkers gemaakt kunnen worden die werken bij de frequenties van microgolven. De versterker van Suhl, die de aanleiding was voor de recente herleving van dit type versterker, gebruikt het verschijnsel van de ferromagnetische resonantie [19]). Een versterker die een variabele capaciteit benut, kan men maken met een geschikt geconstrueerde halfgeleiderdiode. De variabele condensator wordt in dit geval geleverd door de halfgeleider, die ergens een dun, weinig geleidend laagje bevat, waarvan de dikte varieert met de aangelegde spanning. De tegenwoordige belangstelling voor parametrische versterkers hangt ermee samen dat zij, evenals masers, gekenmerkt worden door een geringe eigen ruis [20]).

De praktische bruikbaarheid van de eigenschappen van de vaste materie strekt zich uit over een zeer ruim gebied. Door de bespreking van enkele moderne toepassingen in de elektronentechniek heb ik uiteraard geen recht kunnen laten wedervaren aan de veelzijdigheid van de bestaande praktische toepassingen. Mijn keuze van voorbeelden was er één uit een beperkt gebied, de voorbeelden hadden alle direct of indirect iets te maken met het versterken van elektromagnetische signalen. De nieuwe ontwikkelingen in de metallurgie, om maar iets te noemen, heb ik zelfs niet zijdelings aangeroerd. Veelzijdigheid is het kenmerk van de toepassingen en de eigenschappen van de vaste materie; veelzijdig is ook de theorie van de vaste stof.

Over de theorie zou ik nu in enkele woorden iets willen zeggen. Het is niet mijn bedoeling een gedetailleerde bespreking te geven van de vele, en vaak nogal speciale, begrippen die de theoreticus van de vaste stof in zijn werk hanteert. Niet dat ik van mening ben dat men alleen over theorie kan praten aan de hand van schone of minder schone mathematische formules. Integendeel, ik ben er van overtuigd dat ieder stuk theorie dat werkelijk goed begrepen is, zich leent tot een interpretatie waarbij formules slechts een zeer ondergeschikte rol spelen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Ik ben ook van mening dat een theoreticus die zich, samen met zijn experimentele collega's, aan het onderzoek van de vaste stof wijdt, steeds moet trachten tot een dergelijke, niet formele, interpretatie van de theorie te komen. Dat ik op dit ogenblik afzie van een gedetailleerde discussie van theoretische begrippen, is, omdat zo'n discussie tijd vraagt, de tijd die nodig is om tot een nuancering van een begrip te komen en nodig om de vooronderstellingen en de beperkingen van een begrip te bespreken.

Ik zou daarom liever iets willen zeggen over de structuur en de opbouw van de theorie van de vaste stof [21]). Strikt genomen, is het geheel onjuist om te spreken van *de* theorie van de vaste stof. Men zou dan nog eerder kunnen beweren dat er géén theorie van de vaste stof bestaat. Immers, er is goede reden om te geloven dat de fundamentele wetten van de fysica, voor zover die geformuleerd worden door de theorie van het elektron en het elektromagnetische veld, door de golfmechanica en met de discipline van de statistische mechanica en de daarbij aansluitende thermodynamica, in principe in staat zijn alle of vrijwel alle verschijnselen in vaste stoffen te verklaren. Dat dit in de praktijk een beetje tegenvalt, ligt niet aan een eventueel beperkte geldigheid van de fundamentele wetten, maar aan het ontoereikend zijn van de bestaande technieken om die wetten toe te passen op een zo gecompliceerd systeem als een vaste stof. Beschouwen we voor een ogenblik de fysica van de vaste stof als een smeltkroes voor de theorie. Wij gooien daarin de genoemde basisvakken van de theoretische fysica. Wat er ten slotte uit komt, is niet een fraai eenkristal van vaste-stoftheorie, doch een ten dele amorfe massa, waartussen zich een aantal bruikbare kristallieten bevinden. Deze kristallieten zijn de theorieën van de vaste stof. De brokstukken theorie vertonen een zekere samenhang, maar zij passen lang niet overal goed aan elkaar. Ieder brokstuk is een model, behept met een groot aantal vereenvoudigende veronderstellingen en abstracties.

Naar de aard van de modellen kan men de theorieën van de vaste stof op verschillende wijze indelen. Zo kan men onderscheid maken tussen de macroscopisch-fenomenologische theorieën en de atomaire theorieën. In een macroscopische theorie abstraheert men van het bestaan van elektronen en atomen. De elasticiteitstheorie is daarvan een duidelijk voorbeeld. Bij de atomaire theorieën kan men onderscheid maken tussen de roostertheorieën en de elektronentheorieën. Vanuit een theoretisch gezichtspunt is dit een onderscheid naar de massa van de deeltjes die bestudeerd worden. Een roostertheorie houdt zich bezig met de samenhang en de beweging van de *zware* deeltjes, de atomen, en ziet zoveel mogelijk af van een gedetailleerde beschrijving van het gedrag van de elektronen. Een typische roostertheorie is die van Born en Madelung over de cohesie van ionenkristallen. Zij stamt uit 1912, de tijd van het werk van Von Laue en Bragg over de diffractie van röntgenstralen in vaste stoffen. Voor de theorie van de roostertrillingen en van de soortelijke warmte van het rooster is de ontdekking van het elementaire werkingsquantum h, in het begin van deze eeuw, van grote betekenis geweest. De modellen van Einstein en Debije verbinden de quantumeigenschappen van de harmonische oscillator met het bestaan van een eindig aantal trillingswijzen in een vast medium.

Pas betrekkelijk laat in de geschiedenis van de theorie is de theorie van het imperfecte rooster ontwikkeld. De dislocatietheorie, die oorspronkelijk bedoeld was als een verklaring van de plastische deformatie, is een bijzonder vruchtbare theorie gebleken, die te hulp geroepen wordt bij de verklaring van vele andere verschijnselen in imperfecte roosters. Als half-atomair, half-macroscopisch begrip is de, in 1934 door Taylor bedachte, dislocatie een zeer wezenlijk bestanddeel van de theorie van de vaste stof [22]).

De komst van de golfmechanica rondom 1925 en de daarbij aansluitende theorie van de elektronenspin en de Fermi-Dirac-statistiek heeft een revolutionaire invloed gehad op de theorieën van de *lichte* deeltjes, de elektronentheorieën van de vaste stof. De moderne theorie van de elektronen in de vaste materie staat of valt met de quantummechanische beschrijvingswijze. Aan de ene kant heeft men de quantumtheorie van het ferromagnetisme en het paramagnetisme, waarin de eigenschappen van de elektronenspin in het centrum van de belangstelling staan. Aan de andere kant heeft men de golfmechanische theorieën van het gebonden en het vrije elektron. De, door Bloch en anderen, omstreeks 1930 ontwikkelde bandentheorie, gebaseerd op het golfmechanische model van de onderling onafhankelijke elektronen in een periodiek potentiaalveld, is daarvan de voornaamste vertegenwoordiger. De bandentheorie verklaart, in principe, het bestaan van metalen, halfgeleiders en isolatoren. Zij leidt tot de, voor de halfgeleiders zo belangrijke, begrippen gaten- en elektronengeleiding. Zij leert ook dat elektronen in een periodiek potentiaalveld een oneindig grote vrije weglengte hebben. Zonder dit laatste gegeven zou de moderne transporttheorie niet kunnen bestaan. In de theorieën over het transport van ladingdragers in de vaste stof speelt de wisselwerking tussen de beweging van de

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

atomen en de elektronen een wezenlijke rol. Deze wisselwerking staat op het ogenblik wederom in het centrum van de belangstelling. Het verschijnsel der supergeleiding, dat steeds beter begrepen wordt, hangt hiermede op geraffineerde wijze samen [23]).

Uit het voorgaande blijkt dat de grote en nieuwe denkbeelden die met de quantummechanica in de theoretische fysica gekomen zijn, van fundamentele betekenis zijn geweest voor de ontwikkeling van het theoretische beeld dat wij van de vaste stof hebben. Het is nu wel opmerkelijk dat tijdens de recente periode van hoogconjunctuur in het onderzoek van de vaste stof dit beeld slechts weinig veranderingen heeft ondergaan. De theorie bevindt zich op het ogenblik veeleer in een periode waarin zij verfijnd en uitgewerkt wordt, en, ten dele, in een meer kwantitatieve vorm wordt gegoten. Zo heeft het halfgeleideronderzoek aanleiding gegeven tot een verdere detaillering van de bandentheorie en de transporttheorie. Als men b.v. het vraagstuk aansnijdt over de invloed van eenzijdige druk op de fijnstructuur van het Zeeman-effect van indirecte excitonen in halfgeleiders, wordt de theorie daarbij wel in een zeer gedetailleerde vorm gehanteerd.

Toch mag men hieruit niet concluderen dat de theorie van de vaste stof nu in een min of meer afgeronde vorm is gekomen. In de eerste plaats leert de ervaring dat belangrijke consequenties van een bestaand theoretisch beeld jarenlang over het hoofd gezien kunnen worden. De transistorwerking is hiervan een voorbeeld. De theorie van de transistorfysica past zeer goed in de bestaande denkbeelden over de vaste stof, maar zij werd pas ontwikkeld nadat experimenten de aandacht gevestigd hadden op het bestaan en de betekenis van een eindige recombinatiesnelheid van gaten en elektronen in een halfgeleider, waarop de transistorwerking berust.

Verder zijn er kwantitatieve vragen, zoals: hoe groot is de uittreepotentiaal van cesiumantimonide? hoe groot is de vormingsenergie van een vacature in koper? wat is de bandenstructuur van bismuttelluride? Het zijn vragen die door een theoreticus nog altijd niet met onverdeelde vreugde ontvangen worden. Bij de beantwoording hiervan komt men met algemene gezichtspunten niet ver. Bij berekeningen over dit soort problemen zijn er zoveel momenten waarop men de invloed van de telkens weer noodzakelijke vereenvoudigende veronderstellingen niet kan overzien, dat men geen vertrouwen in het uiteindelijke resultaat kan hebben. Misschien dat elektronische rekenmachines kunnen helpen om op empirische wijze, dat wil zeggen door vergelijking van de resultaten met bekende experimentele gegevens, de relatieve waarde van een groot aantal mogelijke rekenschema's vast te stellen. Maar op de vraag waarom het ene schema blijkbaar betere resultaten geeft dan het andere, blijft een machine natuurlijk het antwoord schuldig.

Ook zijn er een aantal zeer principiële vragen die nog niet goed beantwoord zijn. Er zijn, bij voorbeeld, goede experimentele gronden om aan te nemen dat het geleidingsmechanisme in verscheidene oxydische halfgeleiders niet beschreven kan worden met de bekende, op de bandentheorie gebaseerde, transporttheorie [24]). Nu heeft deze, voor germanium en silicium zo succesvolle, theorie inderdaad haar beperkingen. Zij vooronderstelt het bestaan van onderling onafhankelijke elektronen die slechts zwak met het rooster gekoppeld zijn. Men kan zich daarom afvragen, hoe men de theorie moet opstellen voor de geleiding met elektronen die een zeer sterke wisselwerking met elkaar en met het rooster ondervinden. Er is hier een duidelijke behoefte aan een eenvoudig en realistisch model dat dit probleem theoretisch belicht.

Het is de taak van de theoreticus zo'n model te bedenken, een model dat, zoals altijd, eenvoudig genoeg moet zijn om een mathematische beschrijving toe te laten en tevens voldoende realistisch om het essentiële van het te beschrijven verschijnsel te kunnen weergeven. Het is een interessante taak, waarbij de theoreticus steeds weer gedwongen zal worden zich rekenschap te geven van de nuances, de vooronderstellingen en de beperkingen van de begrippen die hij wil gebruiken. Het is een interessante taak ook, omdat hij zo, misschien, op zeer indirecte wijze, een kleine bijdrage kan leveren tot het tot stand komen van een nieuwe technische toepassing van de vaste stof.

LITERATUUR.

[1]) G. L. Pearson en W. H. Brattain, History of semiconductor research, Proc. Inst. Radio Engrs. **43**, 1794-1806, 1955.

[2]) E. J. W. Verwey, P. W. Haayman en F. C. Romeyn, Halfgeleiders met een grote negatieve temperatuurcoëfficiënt van de weerstand, Philips techn. T. **9**, 239-248, 1947.

[3]) H. C. Torrey en C. A. Whitmer, Crystal rectifiers, Radiation Laboratory Series, no. 15, McGraw-Hill, New York 1948.

[4]) J. Bardeen en W. H. Brattain, The transistor, a semiconductor triode, Phys. Rev. **74**, 230-231, 1948, en het onder [7]) aangehaalde boek van Shockley.

[5]) Zie b.v. de reeks artikelen in het transistornummer van Proc. Inst. Radio Engrs. **46**, 949-1300, 1958 (no. 6).

[6]) Over oxydische halfgeleiders, zie b.v.: E. J. W. Verwey en F. A. Kröger, Philips techn. T. **13**, 41, 1951.
Over magnetische materialen, zie o.a.:
J. J. Went en E. W. Gorter, Philips techn. T. **13**, 213, 1951; J. J. Went, G. W. Rathenau, E. W. Gorter en G. W. van Oosterhout, Philips techn. T. **14**, 33, 1952; G. H. Jonker, H. P. J. Wijn en P. B. Braun, Philips techn. T. **18**, 253, 1956; J. Smit en H. P. J. Wijn, Ferrites, Philips' Technische Bibliotheek, 1959.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

[7]) W. Shockley, Electrons and holes in semiconductors, with applications to transistor electronics, Van Nostrand, New York 1950.

[8]) Vgl. hiervoor H. B. G. Casimir, Wetenschap en industrie, Philips techn. T. **20**, 65-69, 1958.

[9]) B. Bleaney en K. W. H. Stevens, Paramagnetic resonance, Rep. Progr. Phys. **16**, 108-159, 1953. K. D. Bowers en J. Owen, Paramagnetic resonance II, Rep. Progr. Phys. **18**, 304-373, 1955.

[10]) H. B. G. Casimir, Magnetism and very low temperatures, Cambridge Univ. Press, Londen 1940.

[11]) Zie b.v J. S. van Wieringen, Paramagnetische resonantie, Philips techn. T. **19**, 325-337, 1957; D. J. Kroon, Kernspinresonantie, Philips techn. T. **21**, 278-292, 1959 (no. 10).

[12]) J. P. Gordon, H. J. Zeiger en C. H. Townes, The maser — new type of microwave amplifier, frequency standard, and spectrometer, Phys. Rev. **99**, 1264-1274, 1955.

[13]) N. Bloembergen, Proposal for a new type solid-state maser, Phys. Rev. **104**, 324-327, 1956.

[14]) Over de niet-reciprociteit, zie: B. D. H. Tellegen, De gyrator, een elektrisch netwerkelement, Philips techn. T. **18**, 104-109, 1956.

[15]) C. L. Hogan, The ferromagnetic Faraday effect at microwave frequencies and its applications — The microwave gyrator, Bell Syst. techn. J. **31**, 1-31, 1952.

[16]) Zie b.v. F. Kuhrt, Eigenschaften der Hallgeneratoren, Siemens Z. **28**, 370-376, 1954; W. Hartel, Anwendung der Hallgeneratoren, Siemens Z. **28**, 376-384, 1954; W. J. Grubbs, Hall effect devices, Bell Syst. techn. J. **38**, 853-876, 1959 (no. 3).

[17]) L. Esaki, New phenomenon in narrow germanium p-n junctions, Phys. Rev. **109**, 603-604, 1958.

[18]) Zie b.v. B. Bollée en G. de Vries, Experimenten op het gebied van parametrische versterking, Philips techn. T. **21**, 172-176, 1959 (no. 6).

[19]) H. Suhl, Proposal for a ferromagnetic amplifier in the microwave range, Phys. Rev. **106**, 384-385, 1957; H. Suhl, Theory of the ferromagnetic microwave amplifier, J. appl. Phys. **28**, 1225-1236, 1957.

[20]) A. van der Ziel, On the mixing properties of non-linear condensers, J. appl. Phys. **19**, 999-1006, 1948, in het bijzonder blz. 1006.

[21]) Zie o.a. de volgende leerboeken: C. Kittel, Introduction to solid state physics, 2e druk, Wiley, New York 1957; A. J. Dekker, Solid state physics, Prentice Hall, Englewood Cliffs 1957; F. Seitz, The modern theory of solids, McGraw-Hill, New York 1940.

[22]) A. H. Cottrell, Dislocations and plastic flow in crystals, Oxford Univ. Press, Londen 1953.

[23]) Voor een samenvattend overzicht van deze zeer moeilijke materie, zie: C. G. Kuper, The theory of superconductivity, Advances in Physics **8**, 1-44, 1959 (no. 29).

[24]) Zie G. H. Jonker, Analysis of the semiconducting properties of cobalt ferrite, Phys. Chem. Solids **9**, 165-175, 1959 (no. 2), en S. van Houten, Semiconduction in NiO, verschijnt binnenkort in Phys. Chem. Solids.

Samenvatting. Hoofdzakelijke inhoud van de rede, uitgesproken door de auteur bij het aanvaarden van het ambt van buitengewoon hoogleraar aan de Technische Hogeschool te Delft. Aan de hand van het werk aan germanium illustreert de schrijver de stormachtige ontwikkeling op het gebied van de vaste stof. Hij wijst op de belangrijke stimulerende werking zowel van industriële toepassingsmogelijkheden (transistor, magnetische materialen, oxydische halfgeleiders) als van wetenschappelijke nieuwsgierigheid (maser, tunneldiode, parametrische versterker), en maakt een onderlinge vergelijking van de verschillende genoemde soorten versterkers. Van de theorie, of liever: de theorieën, van de vaste stof (de „wortels" van het onderzoek) beschouwt de schrijver verschillende, die zich bezig houden met de samenhang en beweging van zware deeltjes (roostertheorie) dan wel lichte deeltjes (elektronentheorieën, waaronder bandentheorie en transporttheorie). Hoewel van een integrale beschrijving van de vaste stof geen sprake kan zijn, wordt de theorie op allerlei gebieden al vèrgaande gedetailleerd. Gewezen wordt ten slotte op belangrijke nog openstaande vragen, zowel kwantitatieve als principiële.

HET MAKEN VAN DISLOCATIEVRIJE GERMANIUMKRISTALLEN

door B. OKKERSE.

548.571:546.289

Het grote belang van onderzoek aangaande de eigenschappen en de technologie van de halfgeleiders germanium en silicium is duidelijk als men denkt aan de toepassing van deze stoffen bij de fabricage van gelijkrichters en transistors. In het onderstaande artikel vindt men een beschrijving van de wijze waarop het enige tijd geleden in het Philipslaboratorium te Eindhoven gelukt is om monokristallen van germanium te maken die geheel vrij zijn van dislocaties. Dit artikel sluit nauw aan bij een voorgaand, waarin het zuiveren en het op beheerste wijze verontreinigen van de genoemde halfgeleiders behandeld werden.

Een belangrijk onderdeel van het huidige onderzoek van de vaste stof is de bestudering van de wijze waarop de fysische en fysisch-chemische eigenschappen van kristallen zoals men die macroscopisch waarneemt, afhangen van de fysische onvolmaaktheden (fouten) van het kristalrooster. De belangrijkste van deze roosterfouten zijn: 1) het ontbreken van atomen op plaatsen die in het kristalrooster bezet behoren te zijn (de vacatures), 2) de aanwezigheid van atomen op plaatsen die géén roosterplaatsen zijn (de interstitiële atomen) en 3) de lijnvormige roosterfouten of dislocaties.

De aanwezigheid van dislocaties in het rooster van een monokristal is b.v. van invloed op de mechanische eigenschappen, op de diffusie van vreemde atomen, op de snelheid van legeren en van oplossen en, bij halfgeleiders zoals silicium en germanium, op de levensduur van geïnjecteerde ladingdragers. Verder kan een dislocatie al naar gelang van de omstandigheden fungeren als „put" (Engels: sink) of als bron zowel voor vacatures als voor interstitiële atomen, en ook op deze wijze de perfectie van het kristal beïnvloeden. Ten aanzien van de zojuist genoemde halfgeleiders — andere materialen zullen

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

we in dit artikel buiten beschouwing laten — is onderzoek omtrent het verband tussen de roosterfouten en de fysische eigenschappen niet alleen van zuiver wetenschappelijk maar ook van technisch belang, en wel in verband met de fabricage van diodes en transistors.

In het kader van dergelijk onderzoek is het wenselijk om over materiaal te beschikken waarin een bepaald type roosterfout in 't geheel niet aanwezig is. Aan dit verlangen kan echter slechts ten aanzien van één soort fout voldaan worden: daar de puntdefecten thermodynamisch stabiel zijn, kan men alleen denken aan de afwezigheid van dislocaties.

Een materiaal dat in dit verband perspectief bood is germanium. De dislocatiedichtheid — dat is de totale lengte der dislocatielijnen in één cm^3, die dus wordt gemeten in cm/cm^3 oftewel in cm^{-2} — in germaniumkristallen die gemaakt zijn zonder speciale voorzorgen te nemen, is nl. reeds ca. 1000 × zo klein als in de meest perfecte metaalkristallen (orde van grootte resp. 10^4 cm^{-2} en 10^7 cm^{-2}). Enige tijd geleden is het nu inderdaad gelukt om dislocatievrije monokristallen van germanium te maken. We zullen thans allereerst beschrijven welke werkwijze we daarvoor hebben toegepast en op welke fysische grondslagen deze berust. Vervolgens bespreken we de methodes met behulp van welke we de gemaakte kristallen op dislocatievrijheid hebben onderzocht en geven we de argumenten op grond waarvan we menen dat ze inderdaad vrij zijn van dislocaties. Tot slot volgen enkele opmerkingen over de perfectie van de vervaardigde dislocatievrije kristallen.

De bereidingswijze van dislocatievrije germaniumkristallen

De door ons ontwikkelde bereidingswijze voor dislocatievrije monokristallen van germanium is niets anders dan een speciale wijze van optrekken. Men kan het optrekapparaat naar verkiezing gebruiken met een gewone dan wel het uitrusten met de onlangs ontwikkelde drijvende kroes [1]). Bij de bereiding wordt, nadat het roterende entkristal met het vloeibare germanium in aanraking is gebracht en het optrekproces een aanvang heeft genomen, de diameter van het groeiende kristal geleidelijk verminderd tot 1 à 2 mm. Dit geschiedt door de temperatuur van de smelt geleidelijk iets te verhogen. De nieuwe situatie wordt vervolgens

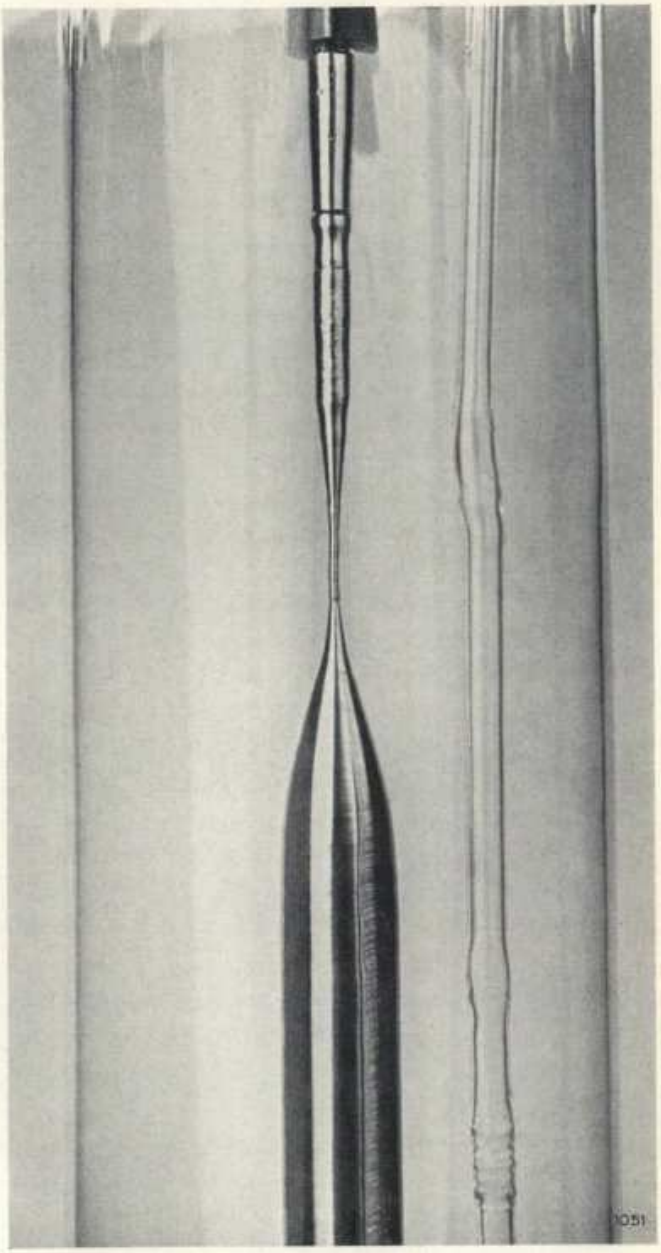


Fig. 1. Men kan met de optrekmethode dislocatievrije monokristallen van germanium maken door de diameter van het eerste deel van het groeiende kristal te verminderen tot 1 à 2 mm en deze diameter over een lengte van ca. 20 mm te handhaven. Men ziet op de foto van boven naar beneden: de enthouder, de ent, het gedeelte met kleine diameter, en ten slotte het dislocatievrije gedeelte waarvan de diameter aanvankelijk toeneemt en vervolgens op een bepaalde gewenste waarde constant blijft. (De onregelmatigheden in de contouren — speciaal van het dunne gedeelte — zijn in hoofdzaak te wijten aan het feit dat het kristal is gefotografeerd door de wand van de glazen buis heen.)

gehandhaafd over een groeilengte van ca. 20 mm. Ten slotte wordt, op analoge wijze, de diameter weer geleidelijk vergroot tot de gewenste waarde (*fig. 1*) en de optrekoperatie voortgezet tot het kristal de gewenste lengte heeft. De snelheid waarmee wordt opgetrokken, kiezen we niet groter dan ca. 1 mm/min (bij normale optrekoperaties is 2 tot 3 mm/min gebruikelijk). De stroomsnelheid van het inerte gas dat het geheel omspoelt, moet goed constant gehouden worden. Ten slotte mogen er,

[1]) Het optrekken van een monokristal uit de smelt is kort geleden in dit tijdschrift beschreven in een artikel van J. Goorissen, Segregatie en dosering van verontreinigingen bij de bereiding van germanium en silicium, Philips techn. T. **21**, 189-199, 1959, waarin men ook verdere literatuurverwijzingen kan vinden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

naar gebleken is, op het oppervlak van het gesmolten germanium geen stukjes vaste stof drijven (zoals b.v. germaniumoxyde of van de kroes afkomstig grafiet).

Fysische aspecten

Het ontstaan van dislocaties in een kristal vereist de aanwezigheid van dislocatiebronnen en van mechanische spanningen. De dislocatiebronnen kunnen zich zowel in het inwendige van het kristal als aan het oppervlak bevinden. Een inwendige bron stelt men zich voor als een op twee punten verankerde dislocatie. Uit een dergelijke bron kan in principe een zeer groot aantal ringvormige dislocaties ontstaan [2]). De aard van de oppervlaksbronnen is nog niet met zekerheid bekend.

Ten aanzien van de mechanische spanningen die voor het ontstaan van dislocaties vereist zijn, merken we op dat deze in een groeiend kristal dat gemaakt wordt met behulp van de optrekmethode, geen andere oorzaak kunnen hebben dan de aanwezigheid van een temperatuurgradiënt. Men kan aantonen [3]) dat een temperatuurgradiënt alleen dàn niet tot het optreden van spanningen leidt, indien: 1) de warmtestroom door het kristal constant is, 2) er geen radiale warmteverliezen zijn, en 3) de groeisnelheid gelijk nul is. Het is duidelijk dat in de praktijk niet volkomen aan deze eisen voldaan kan worden. Gelukkig is dit ook niet nodig; het optreden van een aangroeiende spanning leidt immers allereerst tot elastische deformatie van het kristalrooster en pas indien de spanning een zekere waarde overschrijdt, tot plastische deformatie, dat wil zeggen: tot de creatie van dislocaties [2]).

Men kan nu als volgt verklaren waarom de in de vorige paragraaf geschetste wijze van optrekken inderdaad tot het ontstaan van dislocatievrije kristallen leidt. Door aanvankelijk de diameter te verminderen tot 1 à 2 mm en door langzaam op te trekken, benadert men de eisen waaraan voldaan moet zijn, willen de thermische spanningen nihil zijn. Blijkbaar geschiedt dit in zodanige mate dat het rooster alleen elastisch vervormt en dat het ontstaan van nieuwe dislocaties uit de aanwezige bronnen dus voorkomen wordt. De in het entkristal aanwezige dislocaties raakt men kwijt door het dunne kristalgedeelte niet al te kort te kiezen. Dislocaties die op zeker ogenblik het stolvlak snijden, groeien nl. verder in het later stollende kristalgedeelte. Na enige tijd snijden ze daarbij het kristaloppervlak en zijn dan het kristal „uitgegroeid" (vgl. *fig. 2*).

Gedurende het volgende deel van de optrekoperatie, waarin de diameter van het kristal weer groter gemaakt en ten slotte op een relatief grote waarde constant gehouden wordt, zijn de thermische spanningen ongetwijfeld niet klein. Het is echter moeilijk om dislocaties te genereren in een dislocatievrij germaniumkristal. Zelfs indien men een dergelijk kristal thermisch „mishandelt", b.v. door het tijdens de groei plotseling uit de smelt te trekken, blijken er geen dislocaties in te ontstaan [4]). Voert men daarentegen een dergelijke proef uit met een kristal met een dislocatiedichtheid van ca. 10^4 cm^{-2}, dan neemt deze toe tot 10^6 à 10^7 cm^{-2}.

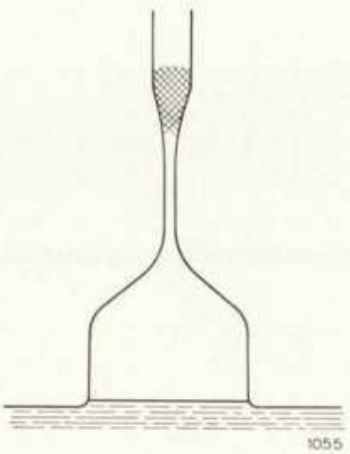


Fig. 2. In het dunne gedeelte van het kristal groeien de aanwezige dislocaties naar het oppervlak en zijn daarmee geëlimineerd, nieuwe kunnen er niet ontstaan doordat de thermische spanningen klein zijn. In het onderste gedeelte, met grote diameter, zijn de thermische spanningen weer groot, maar ze creëren nu geen dislocaties omdat er geen dislocatiebronnen meer aanwezig zijn.

Een merkwaardig verschijnsel doet zich voor indien er op de smelt waaruit men optrekt, stukjes vaste stof drijven en deze tegen het groeiende kristal botsen. In het kristalgedeelte dat na het ogenblik van aanraken ontstaat, vindt men een zich steeds verder uitbreidend netwerk van dislocaties, dat ontspringt bij de plaats van de botsing. Bij de aanraking creëert het vreemde deeltje blijkbaar dislocatiebronnen in het oppervlak van het kristal. Bij het verder groeien van het kristal ontstaan uit deze bronnen door de thermische spanningen dislocaties, die later op hun beurt weer als nieuwe bronnen fungeren, enz. Het bestaan van dislocatiebronnen van dit type is pas kort geleden duidelijk geworden. Gezien het resultaat van de zojuist beschreven proef, waarbij het kristal plotseling werd afgekoeld door het uit de smelt te trekken, komen dergelijke oppervlaksbronnen blijkbaar niet voor in een kristal dat verkregen is uit een smelt met een schoon oppervlak.

[2]) Het mechanisme hiervan is in dit tijdschrift besproken door H. G. van Bueren, Philips techn. T. **15**, 266, 1953.

[3]) P. Penning, Philips Res. Repts. **13**, 79, 1958. Vgl. ook P. Penning, Het ontstaan van dislocaties door thermische spanningen, Philips techn. T. **19**, 375-382, 1957.

[4]) Hetzelfde werd door Dash geconstateerd aan silicium: W. C. Dash, J. appl. Phys. **30**, 459, 1959.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Het bewijzen van de dislocatievrijheid

Ten einde te kunnen bewijzen dat een kristal vrij is van dislocaties, moet men over betrouwbare methodes beschikken om eventueel aanwezige dislocaties aan te tonen. De beste methode waarover men beschikt, is de zg. etsmethode. Deze berust op het volgende verschijnsel. Indien men een germaniumkristal doorsnijdt volgens een {111}-vlak en het met een geschikt middel etst [5]), blijkt het op de plaatsen waar een dislocatie het oppervlak snijdt, sneller op te lossen dan elders, zodat op die plaatsen na enige tijd putjes („etsputten") ontstaan. Men schrijft dit verschijnsel toe aan het feit dat het kristalrooster rondom een dislocatie vervormd is en daar dus per volume-eenheid een grotere energie heeft. Met behulp van een microscoop kan men de etsputten gemakkelijk waarnemen en tellen (*fig. 3* en *4*).

Fig. 3. Indien men een germaniumkristal doorsnijdt volgens een {111}-vlak en etst met een geschikt etsmiddel, lost het daar waar de dislocaties het kristaloppervlak snijden, sneller op dan elders. Iedere etsput correspondeert met een dislocatie. De zijden van de driehoekige omtrek van een etsput zijn snijlijnen van {111}-vlakken met het kristaloppervlak. Vergroting 100×.

Deze etstechniek is gemakkelijk toe te passen en is zeer betrouwbaar gebleken. Men heeft op verschillende wijzen kunnen aantonen dat iedere dislocatie ermee gevonden kan worden [6]). Ook enige door ons uitgevoerde onderzoekingen leiden tot deze conclusie. Hierbij werden de met de etsmethode bepaalde dislocatiedichtheden in germaniumkristallen vergeleken met de resultaten van twee andere methodes. De eerste hiervan berust op de zg. anomale transmissie van röntgenstralen — een effect dat alleen optreedt in perfecte of nagenoeg perfecte kristallen — bij de tweede bepaalt men met welke snelheid koper precipiteert in een met koper oververzadigd germaniumkristal; deze precipitatiesnelheid wordt nl. uitsluitend bepaald door de dislocatiedichtheid en de temperatuur (zie aanhangsel). Bij alle met deze methodes meetbare dislocatiedichtheden — de ondergrens daarvan was in ons geval voor beide ca. 50 cm^{-2}, de bovengrens voor de röntgenmethode is enige duizenden cm^{-2} —, bleken de resultaten uitstekend overeen te stemmen met die van de etsmethode.

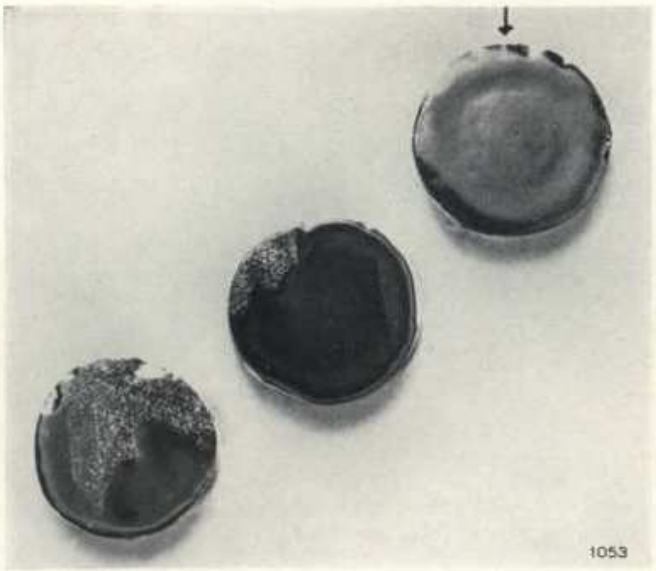


Fig. 4. Geëtst oppervlak van drie plaatjes die gezaagd zijn uit een aanvankelijk dislocatievrij germaniumkristal dat tijdens het optrekken in botsing kwam met een op de smelt drijvend stukje grafiet. Het rechterplaatje is uitgezaagd ter hoogte van het punt waar de botsing plaatsvond, de twee andere steeds 5 mm verder in het later gestolde deel van het kristal. In het punt van botsing (zie de pijl) zijn blijkbaar dislocatiebronnen ontstaan, waaruit een steeds verder uitgroeiend dislocatienetwerk ontspringt.

Gebleken is dat vrijwel alle door ons op de eerder beschreven wijze vervaardigde germaniumkristallen bij etsen geen enkele etsput vertonen (*fig. 5*). Op grond hiervan menen we te mogen concluderen dat deze kristallen vrij zijn van dislocaties. In de weinige die niet dislocatievrij zijn, is de dislocatiedichtheid enige malen 10^3 cm^{-2}. Hoogstwaarschijnlijk is het negatieve resultaat in deze gevallen te wijten aan een triviale oorzaak, zoals de aanwezigheid van een aan de aandacht ontsnapt stukje vaste stof op het oppervlak van de smelt.

Men kan zich afvragen of de bovenstaande conclusie wel gerechtvaardigd is en of het niet denkbaar is dat men een kristal voor dislocatievrij aanziet

[5]) Men kan gebruik maken van het etsmiddel dat beschreven is door E. Billig, Proc. Roy. Soc. A **229**, 346, 1955, of van het etsmiddel dat bekend staat onder de naam CP4 en waarvan men de samenstelling o.m. kan vinden in het in noot [6]) aangehaalde artikel van Vogel et al.

[6]) Zie F. L. Vogel, W. G. Pfann, H. E. Corey en E. E. Thomas, Phys. Rev. **90**, 489, 1953, en W. C. Dash, J. appl. Phys. **27**, 1193, 1956.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

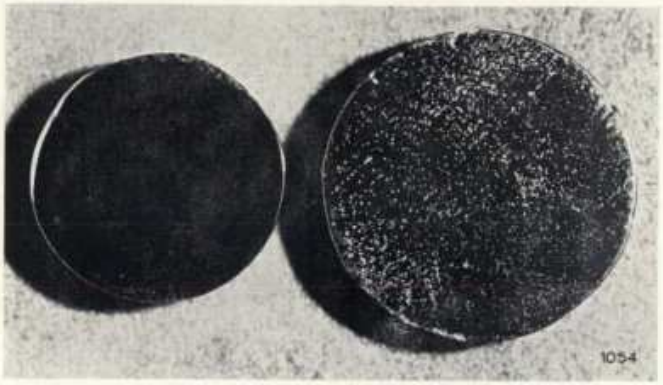


Fig. 5. Geëtst oppervlak van een volgens de beschreven methode opgetrokken germaniumkristal (links) en van een waarbij tijdens het optrekken geen bijzondere voorzorgen werden genomen. Het linker kristal vertoont geen etsputten. Hieruit mag men concluderen dat het geen dislocaties bevat.

doordat de aanwezige dislocaties toevallig het geëtste oppervlak niet snijden. Het antwoord luidt dat de kans hierop bij de door ons gemaakte kristallen uitzonderlijk klein is. Zoals eerder werd geconstateerd, zijn de thermische spanningen in een kristal van normale diameter (1 tot 3 cm) aanzienlijk. Hierdoor zal de dislocatiedichtheid, tenzij deze gelijk nul is, altijd groot zijn (10^3 tot 10^4 cm^{-2}), zelfs indien er aanvankelijk slechts één bron was. De kans dat geen enkele van de eventueel aanwezige dislocaties het geëtste vlak snijdt — een kans die bij een dislocatiedichtheid van b.v. 10 cm^{-2} niet verwaarloosbaar zou zijn —, is dus als nihil te beschouwen. Vindt men in een volgens onze methode gemaakt kristal geen enkele etsput, dan is het dus in hoge mate waarschijnlijk dat het kristal geheel vrij is van dislocaties.

Terzijde zij nog opgemerkt dat uit deze redenering volgt dat men voor het aantonen van de dislocatievrijheid van dergelijke kristallen aan de detectiemethode niet de eis behoeft te stellen dat iedere dislocatie wordt gedetecteerd. In de praktijk zal men echter in de regel toch de etsmethode toepassen, niet zozeer omdat ze de gevoeligste maar omdat ze de eenvoudigste is.

Uit verscheidene onderzoekingen blijkt dat dislocatievrije germaniumkristallen niet perfect zijn. De meeste blijken bij etsen niet op alle plaatsen van een doorsnede even snel op te lossen (vgl. fig. 4). Ook hangt de anomale transmissie van röntgenstralen door gebogen kristallen sterk van de plaats af. Deze verschijnselen wijzen erop dat het materiaal niet homogeen is. Waarschijnlijk wordt dit veroorzaakt door een ongelijkmatige verdeling van de vacatures waarmee juist deze kristallen oververzadigd zullen zijn (of eventueel van agglomeraten daarvan). Daar er geen dislocaties aanwezig zijn die als put kunnen fungeren (zie aanhangsel), moeten de vacatures in dislocatievrije kristallen helemaal naar het kristaloppervlak diffunderen om te verdwijnen. Een groot aantal vacatures krijgt hiervoor tijdens het afkoelen van het kristal niet voldoende gelegenheid en wordt ingevroren.

Aanhangsel: Het bepalen van de dislocatiedichtheid uit de anomale transmissie van röntgenstraling en uit de precipitatiesnelheid van koper

Anomale transmissie van röntgenstraling [7])

De transmissie van röntgenstraling die onder de glanshoek — d.i. de hoek Θ die voldoet aan de reflexievoorwaarde van Bragg — op een perfect kristal valt, kan men beschrijven door het golfverschijnsel in het kristal te splitsen in twee componenten (*fig. 6*). In een richting die evenwijdig is met de netvlakken die de röntgenbundel reflecteren, vertonen beide componenten het karakter van een lopende golf, in de richting loodrecht daarop dat van een staande golf met een periode die gelijk is aan de netvlakafstand d. Bij het uittreden uit het kristal splitsen de beide componenten zich in een doorgaande en een gereflecteerde bundel. Het amplitudepatroon van de

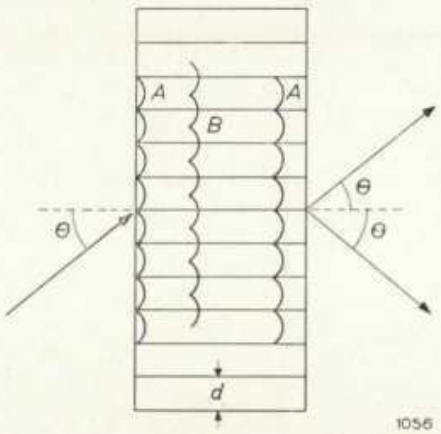


Fig. 6. Ter toelichting van het verschijnsel der anomale transmissie van röntgenstraling die onder de glanshoek invalt op een groep evenwijdige netvlakken van een nagenoeg perfect kristal.

ene component (A) is nu zodanig gelegen dat de minima in de atoomvlakken vallen en de maxima juist daartussen. Deze component wordt dientengevolge nagenoeg niet geabsorbeerd. Van de andere component (B) vallen juist de maxima in de atoomvlakken, zodat deze wèl sterk geabsorbeerd wordt. Is het kristal niet perfect, b.v. door de aanwezigheid van dislocaties, dan wordt ook de eerstgenoemde component meer of minder sterk geabsorbeerd. Het blijkt dat de intensiteit van de doorgaande èn van de gereflecteerde bundel beide sterk afnemen als de dislocatiedichtheid van het kristal toeneemt. De kleinste met onze apparatuur op deze wijze aantoonbare dislocatiedichtheid was ongeveer 50 cm^{-2}; een verlaging van deze grens lijkt zeer wel tot de mogelijkheden te behoren.

Het berekenen van de dislocatiedichtheid uit de precipitatiesnelheid van koper

De mogelijkheid om de dislocatiedichtheid in germanium te bepalen door meting van de precipitatiesnelheid van koper, berust op de wisselwerking tussen dislocaties en vacatures

[7]) Zie L. P. Hunter, J. appl. Phys. **30**, 874, 1959, alwaar men ook oudere literatuur vindt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

enerzijds en tussen in het germanium opgeloste koperatomen en vacatures anderzijds [8]).

In het germaniumrooster kunnen koperatomen zich op twee soorten plaatsen bevinden; ze kunnen in het rooster een germaniumatoom vervangen (substitutie) of ze kunnen zich op een interstitiële plaats bevinden. Atomen van het eerste soort zullen we aanduiden met Cu_s, de andere met Cu_i. De concentraties van beide zijn niet onafhankelijk van elkaar; er bestaat een evenwicht $Cu_s \rightleftarrows Cu_i + V$. In deze vergelijking stelt V de vacature voor die ontstaat indien een substitutioneel koperatoom zijn roosterplaats verlaat en naar een tussenroosterplaats gaat. De substitutionele koperatomen zijn sterk aan hun plaats gebonden (de diffusieconstante is ongeveer 10^{-11} cm²/s) en hetzelfde geldt voor de vacatures; de interstitiële atomen daarentegen zijn zeer beweeglijk (diffusieconstante ongeveer 10^{-5} cm²/s).

Verzadigt men nu een germaniumkristal bij 750 °C met koper en brengt men het vervolgens, na het snel afgekoeld te hebben, op een temperatuur van 500 °C, dan is bij de laatstgenoemde temperatuur het kristal ongeveer 1000-voudig oververzadigd met substitutionele koperatomen. (De oplosbaarheden van substitutioneel koper bij 750 en 500 °C zijn nl. resp. 10^{16} en 10^{13} atomen per cm³. De concentratie der interstitiële atomen kan men buiten beschouwing laten; deze wijkt nl. ten gevolge van de grote beweeglijkheid van de interstitiële atomen nooit sterk van de evenwichtswaarde af.) De overtollige substitutionele koperatomen kunnen slechts snel uit het kristal verdwijnen door eerst interstitieel te worden. Doordat de daarbij ontstaande vacatures slechts langzaam naar een plaats kunnen diffunderen die als „put" (Eng. sink) voor vacatures fungeert — zoals een dislocatie, of het oppervlak van het kristal —, ontstaat er een quasi-evenwicht, waarbij de verhouding van de concentratie van de substitutionele koperatomen en de vacatures constant is. De snelheid waarmee het overtollige koper verdwijnt, en waarmee dus de oplossing overgaat van de oververzadigde naar de normale verzadigde toestand, wordt derhalve bepaald door de snelheid waarmee de vacatures kunnen verdwijnen. De laatstgenoemde snelheid hangt nu op zijn beurt weer af van het aantal aanwezige putten, d.w.z. van de dislocatiedichtheid.

Men kan dus omgekeerd de dislocatiedichtheid bepalen door bij zekere temperatuur T (in ons voorbeeld 500 °C) de karakteristieke tijd τ van het exponentiële tijdsverloop van de evenwichtsinstelling te meten. Praktisch doet men dit door na te gaan, hoe de soortelijke weerstand van het kristal met de tijd varieert gedurende de periode waarin het kristal op de temperatuur T gehouden wordt. Uiteraard bepaalt ook deze temperatuur mede de waarde van τ die men vindt.

Het blijkt dat het produkt van τ en de dislocatiedichtheid N voor iedere temperatuur een constante waarde heeft. Het verband tussen τ en $1/T$ zoals dat experimenteel werd gevonden door Tweet [8]), vindt men afgebeeld in *fig. 7*. Uit deze figuur kan men aflezen dat bij 500 °C de zojuist genoemde constante ongeveer de waarde 10^9 heeft. Vindt men dus bij een meting bij 500 °C een τ-waarde van b.v. 10^4, dan kan men daaruit concluderen dat de dislocatiedichtheid ongeveer 10^5 cm^{-2} is. De kleinste dichtheid waarbij men met deze methode de aanwezigheid van dislocaties kan aantonen, bedraagt evenals in het vorige geval ongeveer 50 cm^{-2}.

Ten slotte willen we hier nog kort bespreken hoe een dislocatie, zoals in het bovenstaande werd betoogd, als put voor vacatures kan fungeren. Zoals bekend, is een randdislocatie te beschouwen als een extra ingeschoven atoomvlak waarvan een

[8]) Vgl. A. G. Tweet, Phys. Rev. **106**, 221, 1957, en P. Penning, Philips Res. Repts. **13**, 17, 1958.

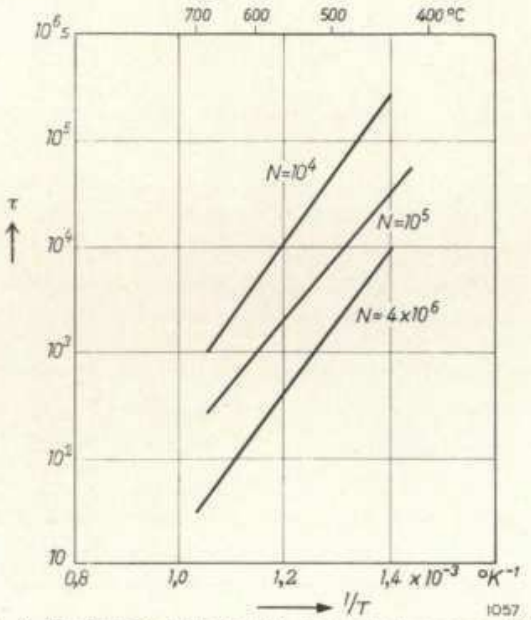


Fig. 7. De karakteristieke tijd τ van het exponentiële tijdsverloop van de precipitatie van koper in oververzadigd germanium uitgezet als functie van de reciproke waarde van de absolute temperatuur T voor drie germaniumkristallen met verschillende dislocatiedichtheid N (cm^{-2}). (Volgens Tweet [8]).)

der grenzen zich in het inwendige van het kristal bevindt. Het is nu zeer goed mogelijk dat een atoom dat zich in de rand van dit vlak bevindt, zich verwijdert en de plaats van een naburige vacature inneemt. Met name is dit het geval indien de dislocatie een knik (Eng. jog) vertoont, welke knik dan één roosterplaats opschuift (*fig. 8*). Omtrent de tijd die een vacature nodig heeft om zo'n knik te bereiken, zij nog opgemerkt dat deze in eerste benadering gelijk is aan de tijd die nodig is om naar de desbetreffende dislocatie toe te diffunderen. De verplaatsing van een vacature langs een dislocatie gaat nl. relatief snel.

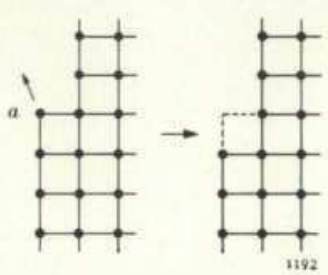


Fig. 8. Een randdislocatie die een knik (Engels: jog) bevat, kan gemakkelijk als „put" voor vacatures fungeren. Getekend is het deel van het „extra ingeschoven" atoomvlak dat zich bij de knik in de rand (links) bevindt. Als het atoom *a* zich losmaakt om de plaats van een naburige vacature in te nemen, gaat de links getekende situtie over in de rechts getekende. De knik schuift daarbij één roosterplaats op.

Samenvatting. Dislocatievrije germaniumkristallen kan men maken met de optrekmethode door in het begin de diameter van hetaan de ent groeiende kristal te verminderen tot 1 à 2 mm. Deze diameter wordt over een lengte van ca. 20 mm gehandhaafd; daarna brengt men de diameter geleidelijk op de gewenste waarde. In het dunne gedeelte groeien de aanwezige dislocaties naar het oppervlak (daarmee zijn ze geëlimineerd), voor het ontstaan van nieuwe zijn de thermische spanningen er te klein. Als bij het vergroten van de diameter ook de thermische spanningen toenemen, worden hierdoor géén dislocaties gecreëerd wegens het ontbreken van bronnen. Drijft er echter op de smelt een stukje vaste stof en botst dit tegen het groeiende kristal, dan ontstaan hierdoor dislocatiebronnen in het oppervlak. Het vrij zijn van dislocaties toont men aan met de ets-methode. Dislocatievrije monokristallen bevatten nog wèl puntdefecten.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

OVERZICHT VAN RECENTE WETENSCHAPPELIJKE PUBLIKATIES DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

Van deze publikaties, voor zover niet met een sterretje * gemerkt, verstrekt de Administratie van Philips' Natuurkundig Laboratorium, Eindhoven, op aanvraag overdrukken.

2668: C. Wansdronk: Het meten van richtingsdiagrammen en overgangsverschijnselen aan luidsprekers (T. Ned. Radiogenootschap **23**, 303-309, 1958, no. 6).

Van luidsprekers zijn niet alleen de frequentie- en de fazekarakteristieken van belang, maar ook hun richtingsdiagrammen en hun gedragingen bij in- en uitschakelen. Dit artikel bevat een korte beschrijving van apparatuur om richtingsdiagrammenn en in- en uitschakelverschijnselen te bestuderen door ze zichtbaar te maken op een oscillograaf.

2669: J. W. L. Köhler: Fysische aspecten bij de ontwikkeling van koudgaskoelmachines (Ingenieur **70**, W 175-W 178, 5 dec. 1958).

De koudgaskoelmachine die bij Philips is ontwikkeld, werkt volgens het zg. proces van Stirling, dat reeds in 1817 bekend was. Dat het tot 1954 heeft geduurd alvorens dit proces in een bruikbare koelmachine werd toegepast, komt doordat bij het proces van Stirling de verschillende fazen van het koelproces zich afspelen in één compacte machine, en niet, zoals bij andere koelprocessen, in min of meer onafhankelijk van elkaar opgestelde onderdelen van de apparatuur. Daardoor treden bij het proces van Stirling een aantal moeilijke kruiseffecten op. In het artikel worden hiervan voorbeelden gegeven, die o.a. de regenerator betreffen, die een der belangwekkendste, maar ook moeilijkste onderdelen van de machine is. Het proces van Stirling is interessant als een mooie illustratie van een reversibel kringproces; de resultaten van de bestudering ervan kunnen niet alleen worden toegepast bij de koudgaskoelmachine, maar ook bij de heetgasmotor, de koudgasmotor en de warmtepomp. Zie ook Philips techn. T. **16**, 33-43, en 61-71, 1954.

2670*: K. Compaan en Y. Haven: Diffusion of tracers through solids (Proc. internat. Symp. on transport processes in statistical mechanics, Brussel, 27-31, aug. 1956, blz. 414-418, Interscience Publishers, New York 1958).

Engelse vertaling van een artikel over de zg. indirecte diffusie in kristallen, dat eerder in het Frans is verschenen; zie deze overzichten no. **2515***.

2671: J. A. Kok: On superconductivity (Physica **24**, 1045-1050, 1958, no. 12).

In dit artikel wordt een tweecomponententheorie van de supergeleiding behandeld. Aangenomen wordt dat een supergeleider bij temperaturen beneden de normale overgangstemperatuur uit twee componenten bestaat; een hiervan is het normale metaal, terwijl de andere een ietwat groter volume inneemt. Het evenwicht tussen de elektronen in de twee toestanden kan via roostertrillingen tot stand komen. Er worden enige speculatieve beschouwingen gegeven over de normale overgangstemperatuur en over de vraag, welke metalen supergeleidend kunnen worden.

2672: H. J. Oskam en H. M. Jongerius: Heliumneon bands (Physica **24**, 1092-1094, 1958, no. 12).

In 1931 werden door Druyvesteyn in het spectrum van een gasontlading in een mengsel van helium en neon, banden waargenomen die hij toeschreef aan een verbinding van helium en neon. Het bestaan van deze banden werd door anderen in twijfel getrokken. Uit recente onderzoekingen (zie b.v. nos. **R 349** en **R 350**) is ook op andere wijze het bestaan van de verbinding HeNe gebleken. Daarom hebben de auteurs de experimenten van Druyvesteyn herhaald; daarbij werden zijn waarnemingen bevestigd.

2673: M. J. Koopmans: A microdispersing apparatus for the use of biological investigation of chemicals (Meded. Landbouwhogesch. Opzoekingsstat. Gent **23**, 831-836, 1958, no. 3/4).

Bij het onderzoek naar de biologische (b.v. fungicide) werking van chemische stoffen die niet in water oplosbaar zijn, wil men dikwijls geringe hoeveelheden (10 tot 50 mg) van deze stoffen als suspensie of emulsie in water beschikbaar hebben. In dit artikel wordt een maaltoestel beschreven dat voor dit doel geschikt is en dat al enige jaren met succes wordt gebruikt. Het toestel bestaat uit een inwendig conisch geslepen glazen vat waarin een goed passende glazen stop roteert. De stop wordt van onderen zo ondersteund dat er enige speling blijft tussen stop en wand. Bovendien bezit de stop

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

een afgeplatte kant, zodat tussen wand en stop een ruimte blijft bestaan waarin het water met de te verdelen stof wordt aangebracht. Verscheidene van deze maaltoestellen worden tegelijkertijd aangedreven door een elektromotor. Na 10 minuten malen is de maximale deeltjesgrootte gewoonlijk nog slechts 10 micron of minder, afhankelijk van de aard van de stof. Aan het water moet een dispergerend middel worden toegevoegd. Enige geschikte middelen, die zelf geen fungicide werking hebben, worden genoemd.

2674: J. Brug, C. A. de Bock, H. D. Moed en A. J. Klein: Antiviral action of derivatives of ω-aminoacetophenone (Brit. J. Pharmacol. Chemother. **13**, 404-410, 1958, no. 4).

Onderzoek naar de invloed van een groot aantal stoffen — alle verwant met 3-amino-4-hydroxy-ω-methylamino-acetofenon — op de vermenigvuldiging van het influenzavirus (stam FM_1) in bebroede kippeëieren die via de allantoïsholte met het virus waren geïnfecteerd. Enige der onderzochte stoffen bleken remmend te werken, nl. de 3-amino-4-hydroxy-ω-alkylamino-acetofenonen en vooral de ω-mono- en de ω-di-alkylamino-5-amino-2,4-dihydroxyacetofenonen. Bij geringe wijzigingen van de chemische structuur der moleculen is de werkzaamheid verdwenen. De antivirale werking werd niet verhinderd door gelijktijdige toediening van reducerende stoffen of van sommige aminozuren of vitaminen. Bij proeven in vitro vertoonden de onderzochte stoffen veelal een virucide gedrag. De werking bij infectie via de allantoïsholte kan worden verklaard uit deze virucide eigenschappen. De stoffen zijn onwerkzaam als de eieren niet via de allantoïsholte, maar via de dooierzak worden geïnfecteerd. Voor de gebleken relatie tussen de antivirale werking en de chemische structuur werd nog geen bevredigende verklaring gevonden.

2675: M. T. Vlaardingerbroek: Measurement of the active admittances of a triode at 4 Gc/s (Proc. Instn. Electr. Engrs. **105 B**, suppl. no. 10, 563-566, 1958).

De auteur heeft de ingangsdemping en de steilheid van de schijftriode EC 57 gemeten met het doel, na te gaan of de looptijdtheorie die Llewellyn en Peterson voor diodes hebben opgesteld, en waarin o.a. de spreiding in de snelheden der elektronen is verwaarloosd, ook bruikbaar is voor triodes. Daar de genoemde grootheden niet rechtstreeks aan de triode kunnen worden gemeten, werden metingen verricht aan een complete versterktrap, waarin de te onderzoeken triode was opgenomen. Uit deze metingen werden de gezochte triode-grootheden berekend. Doordat de EC 57 van een L-kathode is voorzien, kan deze triode met grote stroomdichtheden werken; theorie en experiment vertonen dan redelijke overeenstemming. Bij kleine stroomdichtheden gaat de theorie niet meer op.

2676*: J. H. Spaa: Algunos procedimientos para la producción de neutrones rápidos y monoenergéticos (Ciclo de conferencias celebrado con motivo de la exposición „El átomo y sus aplicaciones pacíficas", blz. 155-168, Sindicato Nacional de Agua, Gas y Electricidad, Madrid 1958). (Enige methodes voor de produktie van snelle monoenergetische neutronen; in het Spaans.)

Verslag van een lezing welke gehouden werd op 21 mei 1958 te Madrid. Na een overzicht van de kernreacties die in aanmerking komen om snelle mono-energetische neutronen te verwekken, worden twee voor dit doel in Philips' Natuurkundig Laboratorium te Eindhoven geconstrueerde apparaten beschreven. Het eerste betreft een generator welke neutronen produceert volgens de D-D-reactie en die gebruik maakt van een 1-MV-hoogspanningsapparaat, dat is opgesteld in een tank die gevuld is met stikstof onder een druk van 10 atm. De neutronen worden verwekt op de rand van een roterende holle schijf die met vloeibare lucht is gevuld en waarop zich een dunne laag zwaar ijs bevindt. Het tweede apparaat is een afgesmolten buis waarin gebruik wordt gemaakt van een Penning-ionenbron en waarbij de neutronen geproduceerd worden doordat tritium dat aan zirconium is geadsorbeerd met deuteronen wordt gebombardeerd. Zie ook Philips techn. T. **17**, 159-161, 1955.

2677*: J. H. Spaa: Algunos nuevos métodos para detectar la contaminación radiactiva del aire y del agua (Ciclo de conferencias celebrado con motivo de la exposición „El átomo y sus aplicaciones pacificas", blz. 173-187, Sindicato Nacional de Agua, Gas y Electricidad, Madrid 1958). (Enige nieuwe methodes om de radioactieve besmetting van lucht en water vast te stellen; in het Spaans.)

Verslag van een lezing, gehouden op 23 mei 1958 te Madrid. Na een algemene beschouwing van enige principes van de „Health Physics" worden twee apparaten beschreven, die zijn ontwikkeld in Philips' Natuurkundig Laboratorium. Met het eerste instrument is het dank zij een speciale compensatiemethode mogelijk om een eventuele besmetting

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van de lucht met radioactieve deeltjes snel vast te stellen. Het apparaat is geconstrueerd om automatisch en stapsgewijs luchtmonsters te nemen en te meten. Vervolgens wordt een apparatuur beschreven om de radioactiviteit van luchtmonsters te meten als deze activiteit zeer gering is. De apparatuur bestaat uit een venstertelbuis, opgesteld in de holle anode van een daarmee in anticoïncidentie geschakelde „waaktelbuis". Door juiste keuze van de materialen, geschikte constructie van de binnentelbuis en de aanwezigheid van de waaktelbuis, wordt een bijzonder klein nuleffect verkregen, waardoor de meettijd voor een zeer geringe activiteit aanzienlijk wordt verkort. Voor de waaktelbuis, zie Philips techn. T. **20**, 121-124, 1958 (no. 4).

2678: G. Meijer: The influence of light quality on the photoperiodic response of Salvia occidentalis (Acta bot. neerl. **7**, 801-806, 1958, no. 5).

Salvia occidentalis is een tropische plant die normaal slechts tot bloei kan komen als de dagelijkse belichting korter is dan een zekere kritische tijd (kortedagplant). Uit eerdere onderzoekingen van de auteur (nos. **2547** en **2548**) is gebleken dat de blauwe en de infrarode componenten van het gebruikte licht de bloei tegengaan. Thans is onderzocht in hoeverre deze verhindering kan worden geneutraliseerd door aansluitende bestraling met rood licht.

Verschenen is:

J. Smit en H. P. J. Wijn: Ferrites, Physical properties of ferrimagnetic oxides in relation to their applications (Philips' Technische Bibliotheek, 1959, XIV + 369 blz., 244 figuren).

De belangrijkste recente ontwikkeling van het ferromagnetisme heeft plaatsgevonden op het gebied van de magnetische oxydes. Bovengenoemd boek geeft de lezer een inzicht in de eigenschappen van ferrieten, met welke benaming alle magnetische oxydes worden aangeduid die ijzer als voornaamste bestanddeel bevatten. Bij de vele theoretische problemen die in het boek worden behandeld, maken de schrijvers meer gebruik van eenvoudige fysische modellen dan van strenge wiskundige afleidingen. Wegens de talrijke toepassingen van ferrieten op elektronisch en ook op algemeen elektrotechnisch gebied is het boek van belang voor ieder die zich op deze gebieden beweegt, alsmede voor metallurgen en anorganisch-chemici.

De afdelingen en hoofdstukken zijn als volgt getiteld:

Part A. Theory: I. On the properties and the origin of magnetic fields in matter. II. Theory of ferromagnetism. III. Ferrimagnetism. IV. Magnetic anisotropies. V. Magnetization processes. VI. Dynamics of magnetization processes.

Part B. Measurements: VII. Methods of measuring ferromagnetic properties.

Part C. Intrinsic properties: VIII. Intrinsic properties of ferrites with spinel structure. IX. Intrinsic properties of ferrites with hexagonal crystal structure. X. Intrinsic properties of ferrites with garnet structure.

Part D. Polycrystalline ferrites: XI. Structure of polycrystalline ferrites. XII. Electrical properties. XIII. Static initial permeability. XIV. Frequency-dependence of the initial permeability. XV. Static hysteresis loops. XVI. Dynamic properties at high field strengths.

Een literatuurlijst en een index besluiten het boek.

Een Franse en een Duitse uitgave van het boek zijn in voorbereiding.

Rectificaties

In het artikel „Parasitaire capaciteiten in neoninstallaties", Philips techn. T. **21**, 1959 (no. 7), blz. 209 linkerkolom, moet de laatste formule als volgt luiden:

$$i = \frac{E}{L_1}\, t \exp\left(-\frac{R_1}{2L_1}\, t\right).$$

Verder moet in de laatste regel „Reële" worden vervangen door „Imaginaire", en in de tweede regel van de rechterkolom „imaginaire" door „reële".

In het artikel „Lichtstipaftasters voor kleurentelevisie", Philips techn. T. **21**, 1959 (no. 8/9), blz. 258 linkerkolom, regel 9 van onderen, vervange men „afneemt" door „toeneemt".

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!